

Université de Montréal

**Simulation numérique du transport et de la dispersion du pollen
d'ambrosie dans la région Rhône-Alpes**

par

Evi Becerra Acosta

Département de Géographie

Facultés des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.sc)
en géographie

Juin 2007

© Evi Becerra Acosta,

6
59
U54
200 7
V.009

AVIS

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

NOTICE

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé :

Simulation numérique du transport et de la dispersion du pollen d'Ambroisie
dans la région Rhône-Alpes

présenté par :

Evi Becerra Acosta

Sera évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Paul Comtois, directeur de recherche

Pierre Richard, président - rapporteur

Bhawan Singh, membre du jury



Résumé

La présence de l'ambroisie en Suisse a été constatée depuis plus de 100 ans, mais dans la dernière décennie les concentrations en pollen de cette plante allergène mesurées à Genève montrent un taux de croissance comparable à ceux observés en France et dans le reste de l'Europe centrale même si les quantités de pollen enregistrées restent plus faible encore d'un ordre de grandeur. Il y a une relation bien connue entre cette augmentation et les cas d'allergies qui a inquiété les aérobiologistes et les allergologues à partir de 2001. Pour cette raison, avant d'initier une coûteuse campagne d'éradication massive, il faut connaître de la façon la plus détaillée possible la distribution spatiale et temporelle de l'Ambroisie ainsi que sa dépendance avec les variables phénologiques spécifiques à la plante, les variables météorologiques, l'humidité du sol, etc.

L'analyse des séries temporelles de la concentration en pollen enregistrée à Genève suggère qu'un transport sur une longue distance depuis la région Rhône-Alpes (France) est possible même si ces données sont également compatibles avec l'existence de sources locales importantes résultant d'une activité colonisatrice efficace en Suisse.

Pour déterminer la provenance du pollen, on a privilégié une approche basée sur l'utilisation d'un modèle atmosphérique régional (MM5) qui fournit des variables météorologiques à un modèle de transport et dispersion de particules (HYSPLIT_4). Le succès de cette approche dépend de la connaissance détaillée de la localisation des sources de pollen mais aussi d'une bonne modélisation du vent.

Au cours de notre travail de recherche, on a trouvé que pour l'année 2001 il existe un transport depuis la région Rhône-Alpes (Romans, Isère) et une production locale importante à Genève (Bernex). De la même façon, pour l'année 2002, on observé un transport depuis une région lointaine (Roussillon et Romans sur Isère) ainsi qu'une production locale à Genève (Bernex). Enfin pour l'année 2003, une source locale a été détectée près de la station de Presinger et une source lointaine à Romans sur Isère.

Mots-clés : transport, source, dispersion.

Abstract

The presence of ragweed has been known for more than a 100 years in Switzerland but it is only in the last ten years that pollen counts in Geneva have shown a growth rate comparable to that measured in France and the rest of Central Europe even though these counts remain one order of magnitude smaller. There is a well known relationship between this growth and the cases of allergies that has alarmed aerobiologists and allergologists alike starting in 2001. For this reason, before costly eradication campaigns are launched it is necessary to learn in detail the spatial and temporal distribution of ragweed pollen as well as its dependence with factors such as its phenology and meteorological and soil variables.

The analysis of ragweed time series suggests long-distance transport from the Rhone-Alps region but one that is also compatible with important local sources that are the result of an efficient colonizing activity of new areas in Switzerland.

To address the problem of the origin of ragweed pollen we have used an approach based on the use of an atmospheric regional model (MM5) that feeds with meteorological variables a transport and dispersion model of particles (HYSPLIT_4). The success of this approach depends not only on detailed knowledge of the location of pollen sources but also on a good simulation of the wind.

In this research we have found that for year 2001 there is transport from the Romans Isere region and also an important local source is identified (Bernex). During year 2002, we found the source to be near Romans sur Isère and Roussillon (south of France) and with a local source in Geneva as well. During year 2003 the models suggest that pollen production sources are local in Presinger and that there is transport from the Romans sur Isère.

Keywords : sources, transport, dispersion.

Table des matières

Table des matières	i
Liste des tableaux	iii
Liste de figures	iv
Remerciements	vii
Introduction	1
 Chapitre 1 ÉTAT ACTUEL DES CONNAISSANCES	 4
1.1 Description de la plante	4
1.2 Description du pollen.....	6
1.3 Problèmes de santé.....	6
1.4 Distribution géographique et envahissement du pollen d'ambrosia	7
1.5 Le transport du pollen et les facteurs météorologiques.....	7
1.6 Intérêt de la modélisation.....	10
 Chapitre 2 METHODOLOGIE	 11
2.1 Objectifs	11
2.1.2 Transport, dispersion et émission du pollen	12
2.1.3 Conservation du pollen dans l'atmosphère	12
2.1.4 Les modèles de méso-échelle	13
2.2 Modèle météorologique de Méso-échelle (MM5)	14
2.2.1 Description du Modèle MM5	15
2.3 Modèle HYSPLIT_4	16
2.3.1 Description du modèle HYSPLIT_4	17
2.3.2 Trajectoires avec HYSPLIT_4.....	18
2.3.3 Dispersion avec HYSPLIT_4	19
2.3.4 Concentration avec HYSPLIT_4	19
2.4 Sources polliniques	19

2.4.1 Rétro-trajectoires pour localiser les sources	20
2.5 Données polliniques (Ambrosia) et météorologiques	35
2.5.1 Collecte des données	35
2.5.2 Données météorologiques	35
2.5.3 Définitions des variables.....	36

Chapitre 3 RESULTATS

3.1 Article	37
-------------------	----

Chapitre 4 CONCLUSION.....	74
----------------------------	----

Bibliographie	77
---------------------	----

Liste des tableaux

Table 1 Définition des paramètres météorologiques	26
Table 1 Sources and dates of simulated release	44

Liste des figures

Figure 1. Cycle de l'ambrosia	5
Figure 2. Description du modèle MM5	15
Figure 3. Approche Eulérienne, dérivée locale, solution pour tout le domaine, idéale pour les sources multiples où $\partial C/\partial t$ représente la dérivée partielle locale de la concentration par rapport au temps	17
Figure 4. Approche Lagrangienne, dérivée totale, solution uniquement sous la trajectoire idéale pour les sources ponctuelles. dC/dt est la dérivée totale de la concentration par rapport au temps	18
Figure 5 . Rétro -trajectoires (a) Bernex (b) Avully (c) Presinger (d) Hôpital (e) Meyrin 27-08-2001	22
Figure 6 Rétro - trajectoire (a) Bernex (b) Avully (c) Presinger (d) Hôpital (e) Meyrin 28-08-2001	24
Figure 7 Rétro - trajectoire (a) Bernex (b) Avully (c) Presinger (d) Hôpital (e) Meyrin 03-09-2001	26
Figure 8 Rétro - trajectoire (a) Bernex (b) Avully (c) Presinger (d) Hôpital (e) Meyrin 04-09-20	28
Figure 9 Rétro - trajectoire (a) Bernex (b) Avully (c) Presinger (d) Hôpital (e) Meyrin 07-09-2002	30
Figure 10 Rétro - trajectoire (a) Bernex (b) Avully (c) Presinger (d) Hôpital (e) Meyrin 08-09-2002	32
Figure 11 Rétro - trajectoire (a) Bernex (b) Avully (c) Presinger (d) Hôpital (e) Meyrin 05-09-2003	44
Figure 1 (a) Time series of pollen concentrations (grains/m ³) for time period from 25-August to 05-September 2001 at Lyon and Bernex and Avully , (b) same for Lyon, Presinges, Hôpital Meyrin, and (c) time series of wind direction (degrees from north) at Geneve (2001).....	46

Figure 2 (a) Time series of pollen concentrations (grains/m³) for time period from 3-September to 8-September 2002 at Lyon, Rousillon, Bernex, Avully, (b) Lyon, Roussillon, Presinges, Hôpital, (c) Lyon, Roussillon, Meyrin and (d) wind direction46

Figure 3 (a) Time series of pollen concentrations (grains/m³) for time period from 02-September to 10-September 2003 at Lyon, Rousillon, Bernex, Avully, and (b) Lyon, Roussillon, Presinges, Hôpital and (c) Lyon, Roussillon, Meyrin and (d) wind direction48

Figure 4a. Upper panel surface wind (m/s) and sea level pressure fields (mb) from MM5 for August 27, 2001. Lower panel same but for September 3, 200250

Figure 4b. Upper panel surface wind (m/s) and sea level pressure fields (mb) from MM5 for September 4, 2002. Lower panel same but for September 9, 2002.....51

Figure 4c. Surface wind (m/s) and sea level pressure fields (mb) from MM5 for September 5, 2003.52

Figure 5 Source location55

Figure 6 (a) Time series of observed and modeled pollen concentrations at the 5 receptor sites: Bernex, Avully, Hôpital, Presinges, Meyrin. Also shown is the modeled time series for each proposed experiment for August 26 and 27,56

Figure 6 (b). Concentrations of pollen at 3 different times from left to right: August 26 1000Z, August 26 1800Z and August 27 0000Z for EXP3 and August 27 0800Z August 1800Z and August 28 0000Z, 2001 for EXP1.....57

Figure 7 (a). Time series of observed and modeled pollen concentrations at the 5 receptor sites: Bernex, Avully, Hôpital, Presinges, Meyrin. Also shown is the modeled time series for each proposed experiment for September 3, 200158

Figure 7. (b) Concentrations of pollen at 3 different times from left to right: September 3 0600Z, September 3 1800Z and September 4 0000Z for EXP1 and EXP2, and 3 September 1000Z, September 3 1800Z and 4 0000Z EXP3, 2001 for EXP3,.....59

Figure 8 (a). Time series of observed and modeled pollen concentrations at the 5 receptor sites: Bernex, Avully, Hôpital, Presinges, Meyrin. Also shown is the modeled time series for each proposed experiment for September 4 200261

Figure 8 (b). Concentrations of pollen at 3 different times from left to right: September 4 0800Z, September 4 1800Z and September 5 0000Z for EXP1 and EXP2, and September 4 1000z, September 4 1800Z and September 5 0000Z, 2002 for EXP3.....62

Figure 9 (a). Time series of observed and modeled pollen concentrations at the 5 receptor sites: Bernex, Avully, Hôpital, Presinges, Meyrin. Also shown are the modeled time series for each proposed experiment for September 7 and 8, 200263

Figure 9 (b). Concentrations of pollen at 3 different times from left to right: September 8 0600Z, September 8 1800Z and September 9 0000Z 2002 for EXP1 and EXP364

Figure 10 (a). Time series of observed and modeled pollen concentrations at the 5 receptor sites: Avully, Hôpital, Presinges, Meyrin. Also shown is the modeled time series for each proposed experiment for September 5 200365

Fig. 10 (b) Concentrations of pollen at 3 different times from left to right: September 5 0800Z, September 5 1800Z and September 6 0000Z 2003 for EXP1 and EXP366

Introduction

L'importance du pollen d'ambroisie (*Ambrosia artemisiifolia*) est liée à son pouvoir allergénique très puissant (Jager, 2000). Ce pollen est la cause de maladies du système immunitaire. En Europe, on estime que de 16 à 20 % des personnes souffrent de maladies en rapport au pollen comme l'asthme allergique (Makra *et al.*, 2004).

L'ambroisie est originaire de l'Amérique du nord. Elle s'est répandue très rapidement en Europe centrale et du sud, ainsi que dans le nord et l'ouest du continent (Rybincek *et al.*, 2000; Nikkels et Spieksman, 1998). Cette plante se caractérise par son aptitude à envahir et à se répandre dans différents types de sol. Par exemple, elle peut croître dans un jardin comme dans un terrain délaissé ou dans un champ cultivé. Sa hauteur varie entre 20 cm et 1,20m (Guerin, 1993, Laaidi *et al.*, 1997). Le grain de pollen est tricolporé avec un rayon moyen de 25 μm (Guérin, 1993). Le pollen d'*Ambrosia* est connu comme un aéroallergène très dangereux (Jager, 2000).

En France, cette plante est très commune dans la région Rhône-Alpes. L'envahissement par l'ambroisie dans les villes de Lyon, Bourgoin, Grenoble et Roussillon a été étudié pendant les années 1987 à 2002 par Thibaudon *et al.*, en 2003. D'autres études ont été réalisées dans les alentours des villes de Clermont-Ferrand, Saint Etienne, Grenoble, Annecy et Montluçon et en Bourgogne par Laaidi et Laaidi en 1999 et par Laaidi *et al.*, en 2003. En Suisse (Leuschner *et al.*, 1990), le pollen peut être transporté depuis la France ou la Vallée du Pô en Italie. Toutefois, plus récemment, une production locale a été identifiée en Genève, Suisse (Clot *et al.*, 2002).

L'émission, le transport et la dispersion du pollen, ainsi que sa concentration dans l'atmosphère, sont liés aux différents processus météorologiques de façon très complexe. Premièrement, la libération du pollen dépend de la température (ou plutôt de la température accumulée), de l'humidité relative, de la vitesse du vent, des précipitations, et de la turbulence près de la surface du sol. Il est clair que ces paramètres influencent la libération du pollen et sa dispersion. Dans une situation idéale, le rapport entre la

production et la libération du pollen d'ambroisie pourrait aider à prédire les indices de concentration pollinique dans l'atmosphère (Comtois, 1996). Dans cette perspective, le but de ce travail est d'expliquer, à partir de la modélisation du vent et des sources, le comportement des quantités de pollen mesurées dans la ville de Genève (Suisse) et Lyon France.

Le présent mémoire est divisé en 4 chapitres distincts. Le premier est entièrement consacré à une recherche bibliographique et présente le contexte dans lequel se situe la présente étude. On y évoque aussi les problèmes de santé qui ont rendu ce type de recherche nécessaire. Les modèles de méso échelle ont été conçus pour permettre différents types d'études. Par exemple, ils peuvent être utilisés pour fournir des prévisions météorologiques à partir de conditions initiales définies en utilisant les observations météorologiques disponibles; on parle alors de pronostic. Dans d'autres cas, si certaines données disponibles sont insuffisantes, les modèles peuvent être utilisés pour aider à une meilleure estimation des variables manquantes; on parle alors d'étude diagnostique. Notre travail est typiquement une étude diagnostique : on a essayé d'améliorer nos connaissances sur les émissions de pollen d'Ambroisie en comparant la variation temporelle de la concentrations en pollen prévue par le modèle avec différents scénarios d'émission avec les observations disponibles.

L'émission, le transport et la dispersion du pollen sont liés aux facteurs météorologiques qui vont déterminer l'évolution spatiale et temporelle des concentrations du pollen.

Le second chapitre présente la méthodologie. Nous y détaillons les objectifs visés, le cadre de l'étude et les procédures utilisées au cours de ce travail depuis l'installation des modèles et leurs caractéristiques jusqu'à l'interprétation des données. On y indique la localisation des sites d'échantillonnage. On y décrit également comment la météorologie synoptique est obtenue à partir des sorties du modèle atmosphérique MM5, les données d'observations en surface pour les stations situées en France et à Genève et la collecte de données aérobiologiques. Le troisième chapitre est présenté sous la forme d'un article à soumettre pour publication. Le but de cet article est de présenter une étude préliminaire sur le transport et la dispersion du pollen d'herbe à poux (Ambroisie) dans la région

Rhône Alpes et en Suisse. Il faut remarquer que pour les périodes étudiées, il n'existe pas de carte détaillée de la distribution géographique de l'ambrosie dans cette région. En particulier, la répartition détaillée des sources est inconnue, de même que leur densité et leur taille moyenne. Dans ce travail, deux méthodes d'analyse ont été utilisées pour localiser les sources. La première méthode est basée sur l'utilisation de simulations de transport direct. La deuxième utilise un calcul de rétro-trajectoire. Ces méthodes vont nous aider à distinguer les effets d'un transport de particules de pollen sur une longue distance et un transport local.

Enfin le chapitre quatre présente une conclusion générale de l'ensemble du travail.

CHAPITRE 1

ÉTAT ACTUEL DES CONNAISSANCES

1. Description de la plante

L'ambrosie est une plante sur laquelle les fleurs mâles et femelles sont réunies sur le même pied. Dans le cas des plantes monoïques, les fleurs staminées sont le plus souvent situées vers la partie supérieure du végétal de sorte que le pollen s'échappant des loges de l'anthere tombe naturellement et par son propre poids sur les fleurs pistillées placées en dessous (Guérin, 1993). L'*Ambrosia trifida* est la plus répandue en Europe. Sa taille varie de 30 cm à 1,80 m (Guérin, 1993). L'*Ambrosia Artemisiifolia*, qui est l'objet de ce travail est une plante dont la taille varie de 20 à 120 cm. Elle commence son étape de pollinisation 10 semaines après la floraison (Taramarcaz *et al.*, 2005). Il s'agit d'une plante rudérale qui pousse sur les terrains mal entretenus, souvent dans les lotissements et les terrains délaissés (Maurer, 2003). On la trouve également le long de routes, des cours d'eau et des voies ferrées, ainsi que dans certaines cultures (maïs, tournesol et soja) et dans les jachères (Maurer, 2003).

C'est une plante annuelle. Son cycle de vie commence dès la levée de dormance des gravier de la plante, entre les mois d'avril et de mai. Sa croissance et sa floraison ont lieu durant les mois de juin et juillet.

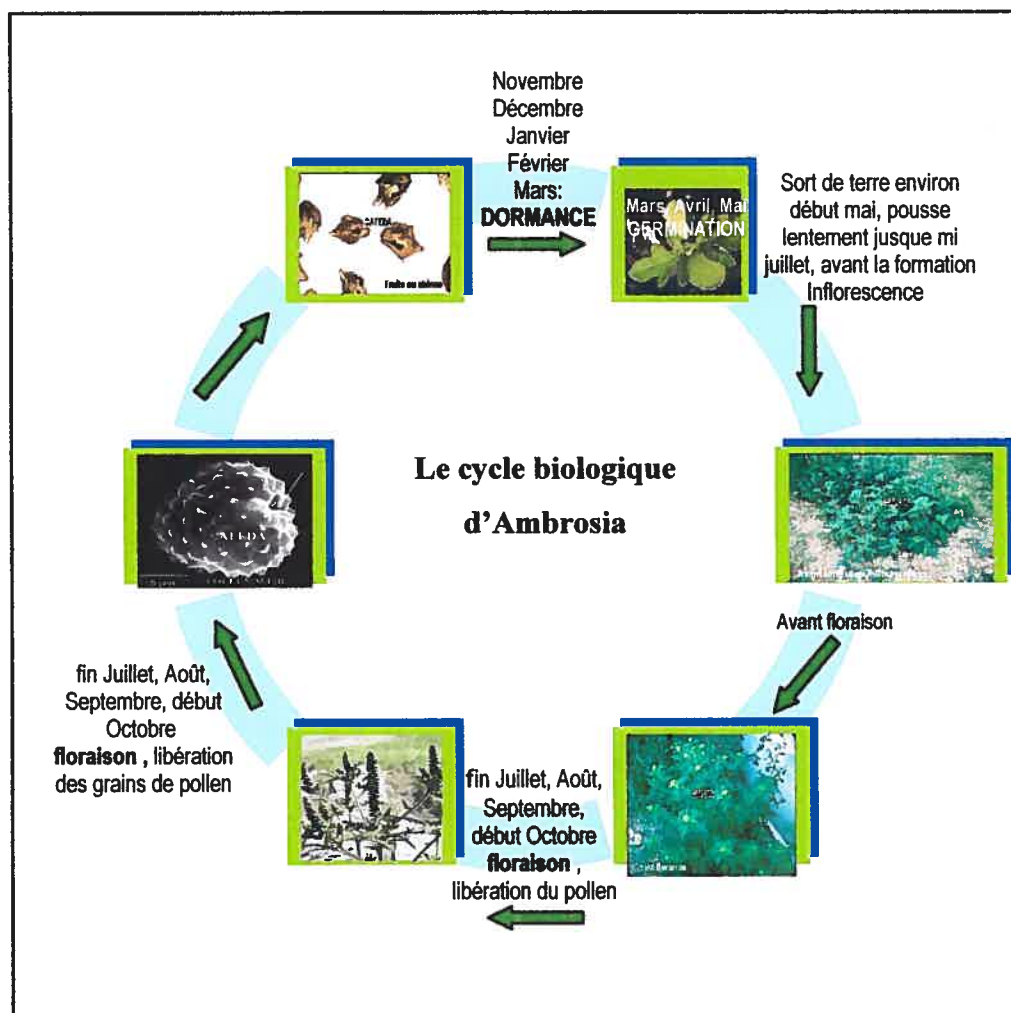


Figure 1. Cycle biologique de l'ambrosie

Sa pollinisation commence entre Août et Septembre. C'est pendant cette période que la plante libère un maximum de grains de pollen. La fin de la saison pollinique se situe entre les mois d'octobre et de novembre (voir figure 1). La plant mort et pendant tout le reste de l'année, ses graines reste en état de dormance.

1.2 Description du pollen

Le pollen d'Ambrosia est petit et sphérique avec un rayon moyen de 25 microns. La paroi pollinique présente une ornementation spinuleuse. Le pollen est facilement transporté par le vent et il peut ainsi facilement parcourir des centaines de kilomètres. Le pollen est caractéristique du point de vue adhésivité, quantité, structure et distribution du mode anémogame de la plante. La quantité de pollen émise (charge pollinique) est très importante chez cette espèce ; certains auteurs estiment qu'elle est de l'ordre de 90.000.000 grains par gramme de pollen¹. Un pied d'ambrosie pourrait produire jusqu'à 2,5 milliards de grains de pollen. Tous les grains de pollen des différentes espèces d'*Ambrosia* répondent sensiblement à la même description. La production du pollen d'ambrosie commence à la levée du soleil et continue pendant tout le matin. Le maximum de la production est atteint vers midi (Tarmarcaz *et al.*, 2005). La température et l'humidité relative ont un impact minimal sur le recueil des données de pollen émis chaque jour. En revanche la précipitation et les conditions de stabilité atmosphérique ont un grand impact sur la collecte des données polliniques (Tarmarcaz *et al.*, 2005).

1.3 Problème de Sante

L'ambrosie est une plante nuisible pour la santé. Le pollen libéré lors de sa floraison provoque des troubles allergiques multiples toujours gênants et parfois graves (asthme). En 1926, les chercheurs avaient remarqué que, en Suisse, le nombre de cas de rhume des foins des habitants des villes était 10 fois plus important que celui des habitants de la campagne. Ce résultat est étonnant dans la mesure où les plus grandes concentrations de pollen se trouvent à la campagne².

¹ <http://www.ambrosie.info/docs/Rapport%20ambrosie%201998.pdf>

² http://expasy.org/prolune/pdf/prolune013_fr.pdf

Actuellement, sur une échelle allant de 1 à 5, son potentiel allergisant est de 5 (Makra *et al.*, 2004). On estime que 10 à 12% de la population de la région Rhône-Alpes est touchée par cette pollinose (Dechamp, 1996 ; Maurer, 2003). Les personnes déjà allergiques sont les plus sensibles. La période à risque se situe en août et en septembre, avec des pics de concentration variant suivant les conditions climatiques.

Au Québec, 10% de la population est affectée par l'herbe à poux chaque année. Les coûts annuels de santé reliés à ce problème sont estimés à près de 50 millions de dollars canadiens³. Les allergies les plus fréquentes sont : rhinite, conjonctivite, trachéite, asthme, urticaire ou plus rarement eczéma.

1.4 Distribution géographique et envahissement de l'ambroisie

En Suisse, l'ambroisie (*Ambrosia artemisifolia* L.) est signalée depuis plus de 100 ans. Au cours de la dernière décennie, des signes d'une présence accrue de l'ambroisie et de son pollen se manifestent dans le sud-ouest de la Suisse, en particulier à Genève. (Clot, 2002). Le genre *Ambrosia* comprend environ 40 espèces réparties surtout dans les régions chaudes d'Amérique. En France et en Suisse, plusieurs espèces sont présentes dans la flore.

Les conditions d'introduction des plantes étrangères sont souvent mal connues. On remarque que l'introduction de l'Ambroisie (ou herbe à poux; Ambroisie en Europe) s'est faite par les régions littorales, plus particulièrement dans les ports. L'ambroisie aurait fait son apparition dès 1863 en Allemagne et en Angleterre, puis aurait envahi la Belgique et la Hollande à la même période. A Lyon (France), l'introduction de cette espèce date de 1930, probablement par le biais de sacs de graines de trèfle (Touraine, 1984). Cependant, quelques cas ont été trouvés dès 1875 dans certaines régions de France comme la Vallée de la Loire ou la Vallée du Rhône (Coste et Laaidi, 2003). Depuis plusieurs dizaines d'années, la région Rhône-Alpes est exposée à l'ambroisie, considérée comme «la mauvaise herbe des chantiers et des lotissements ».

³ <http://www.santepub-mtl.qc.ca/Environnement/herbe/manchette/01072002.html>

L'ambrosie est originaire d'Amérique du Nord. Initialement, on la trouvait essentiellement au Canada et aux Etats-Unis. Actuellement, on la trouve aussi dans toute l'Europe. Par exemple en Hongrie, le bassin des Carpathes est l'endroit le plus pollué par le pollen d'ambrosie (Makra *et al.*, 2004). L'ambrosie a été trouvée dans deux régions du nord-est de l'Italie, en Lombardie et en Vénétie (Friuli Venezia Giulia). Dans tout le reste du pays, il n'existe pas de données publiées sur l'existence de l'ambrosia (Cecchi *et al.*, 2006). Dans la république Tchèque, l'*Ambrosia artemisiifolia* a été trouvée au sud du pays en Bohême et aussi au sud de la Moravie (Rybníček *et al.*, 2000). On trouve aussi le pollen d'*Ambrosia* dans l'air de la Bulgarie à Sophia (Yankova *et al.*, 2000). En Suisse, pendant l'été 2003, dans le canton de Genève, des chercheurs ont trouvé une aire de 21,5 hectares infestée par l'ambrosie (Maurer, 2003).

L'envahissement par l'ambrosie dans la région Rhône Alpes (France), dans les villes de Lyon, Bourgoin, Grenoble et Roussillon a été étudié pendant les années 1987 à 2002 (Thibaudon *et al.*, 2003). Ce groupe de chercheurs a suivi l'évolution de l'envahissement par le pollen d'ambrosie. Ainsi, ils ont pu constater un envahissement et une prolifération rapide du pollen de cette plante. En 2003, dans cette même région, mais cette fois dans d'autres villes (Saint-Étienne, Clermont-Ferrand et Montluçon) les indices de concentration de pollen d'ambrosie sont très élevés (Thibaudon. *et al.*, 2004). Dans cette même étude, dans la ville de Chalon-sur-Saône, les pics journaliers de concentration pollinique ne se produisent pas le matin mais, plutôt en fin de la journée, vers 18h-20h. Ces enregistrements de pollen en fin d'après midi sont remarquables. Ils semblent indiquer que le pollen observé provient de régions lointaines et ne résulte pas d'une production locale.

L'envahissement de nouvelles régions par le pollen d'ambrosie est-il le résultat d'un transport atmosphérique depuis une région lointaine ou d'une production locale ?

Le problème de l'envahissement par l'ambrosie en Europe et en Amérique fait encore l'objet de recherches actives mais malheureusement il n'existe pas encore de carte détaillée de la distribution d'ambrosie en Europe et en Amérique permettant de faire une comparaison.

1.5 Le transport du pollen et les facteurs météorologiques

Les facteurs météorologiques jouent un rôle important dans la production, la libération, le dépôt et la dispersion des grains de pollen. Les effets de la température, de l'humidité relative et des précipitations sont les plus importants. Les mêmes variables météorologiques peuvent avoir des effets différents dans les différentes étapes du cycle de la plante.

Les facteurs primaires sont ceux qui interviennent directement sur la physiologie des espèces végétales au moment de la croissance des plantes et du développement floral, en conditionnant la production du pollen. Les facteurs secondaires gouvernent ensuite la libération des grains dans l'air lorsque les anthères (parties fertiles des étamines) sont parvenues à maturité. Enfin, les facteurs tertiaires régissent la dispersion ultérieure de ces grains (Laaidi, 1999 et 2003).

Les facteurs primaires, on vient de le dire, commandent la maturation. Il est évident qu'une plante ne peut arriver à maturité que si la température est favorable. Plus précisément, ce qui importe, c'est moins la valeur de la température à la date de la floraison, ou dans les jours qui l'ont immédiatement précédée, que le cumul des températures sur l'ensemble de la période de croissance. Les facteurs secondaires interviennent lors de la libération des grains de pollen. Une fois le bourgeon floral arrivé à maturité, un excès d'humidité relative (plus de 80 %), ou plus encore la présence de pluie, freine l'ouverture des étamines, alors qu'un air sec favorise l'éclatement des anthères. L'ouverture des fleurs et la bonne disposition spatiale des anthères qui contiennent les sacs polliniques sont également contrôlées par la pression atmosphérique (qui doit être élevée) et par la température (l'optimum correspondant à une forte montée des températures au cours de la journée). C'est donc presque toujours en l'absence de pluie, par beau temps anticyclonique ensoleillé et chaud, avec des amplitudes thermiques notables entre le jour et la nuit, que se produisent les plus fortes émissions de pollen (Laaidi, 1999 et 2003). Le vent joue un rôle important sur le transport du pollen sur de longues distances (Gregory, 1978, Bourgeois *et al.*, 1985). Certaines études (Cecchi *et*

al., 2006) ont montré que la direction du vent peut donner une indication sur la provenance du pollen.

1.6 Intérêt de la modélisation

En plaçant une source de pollen à différents endroits, on peut modéliser la concentration pollinique au niveau des récepteurs où les mesures sont effectuées. La comparaison entre les concentrations observées et simulées au niveau des récepteurs permet de choisir, parmi les différentes hypothèses touchant la localisation des sources, celle qui permet de reproduire le plus fidèlement les observations. On parle d'approche source - récepteur. La modélisation nous permet donc de tester nos hypothèses sur la localisation des sources de pollen.

CHAPITRE 2

CADRE METHODOLOGIQUE

2.1 Objectifs

La prédiction du transport et de la dispersion dans l'atmosphère des particules d'aérosols biologiques sur de longues distances est d'une grande importance pour les études de pollution et de santé.

L'objectif du travail présenté dans ce mémoire est de connaître s'il existe un transport du pollen d'ambrosie de la Région Rhône-Alpes en France vers la région de Genève en Suisse. On considèrera aussi la possibilité d'une production locale de pollen.

En général, les quantités de pollen en Suisse sont faibles, mais dans le sud-ouest, c'est à dire dans la ville de Genève, elles sont plus élevées, probablement à cause des vents dominants en provenance de la région de Lyon et du Lessin (Clot, 2002).

Notre hypothèse est que la Région Rhône-Alpes (France) est la principale source du pollen transporté par le vent, observé dans la région de Genève. En effet, d'après les travaux de Bernard Clot, (Clot, 2002), la région Rhône-Alpes est une des plus importantes sources de pollen d'ambrosie connue. Selon ces travaux, l'ambrosie mesurée en Suisse a été transportée sur de longues distances. L'analyse comparée des données de Lyon et de Genève a montré que la quantité de pollen enregistrée à Genève est proportionnelle à celle mesurée à Lyon, mais dans un rapport plus faible, ce qui est compatible avec une possible dilution provoquée par un transport sur plus de 200 km (Clot, 2002).

2.1.2 Transport, dispersion et l'émission du pollen

Le transport du pollen sera traité de la même manière que celui d'un gaz ou d'un nuage de particules minuscules capables de se maintenir en suspension dans l'atmosphère sans précipitation remarquable.

Les modes de dispersion des polluants par le vent sont très variables suivant la stabilité de l'atmosphère. Les conditions atmosphériques peuvent en effet faire en sorte qu'un polluant puisse voyager sur de longues distances sans être bien dispersé, ou au contraire être dispersé rapidement depuis la source d'émission aussi bien horizontalement que verticalement. Différentes études empiriques et théoriques indiquent que le pouvoir de dispersion dans l'atmosphère dépend de la vitesse du vent, de la rugosité du sol et de la stabilité thermique (Haltiner, 1957).

Dans le présent travail, les émissions de pollen seront traitées comme si elles émanaient d'une région appelée source.

2.1.3 Conservation du pollen dans l'atmosphère

Le mouvement du pollen atmosphérique est un phénomène très complexe qui est influencé par de nombreux paramètres environnementaux. Une des approches possibles pour décrire la variation spatiale et temporelle de la concentration en pollen est basée sur l'utilisation de modèles numériques régionaux de l'atmosphère. Ces modèles résolvent les équations de mouvement de l'air à partir de conditions initiales données pour une région limitée. Ensuite, des modèles de transport de particules (Eulériens, Lagrangiens ou encore utilisant une approche mixte) se servent des informations relatives au vent fournies par les modèles régionaux pour calculer le déplacement des particules selon les directions horizontales et verticale, compte tenu de l'orographie du terrain, de la turbulence et de la stabilité atmosphérique. Lorsque le pollen est en suspension dans l'air, on peut l'étudier comme un aérosol passif sans transformation.

En utilisant diverses techniques numériques (Pielke, 2002), les modèles de transport permettent de résoudre l'équation de conservation de la masse pour le pollen, à savoir :

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_i u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_i v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_i w) = S - P \dots (1)$$

ρ_i représente la concentration du pollen de l'espèce i (nombre de grains de pollen par unité de volume d'air). S et P représentent respectivement les sources et les puits de grains de pollen par unité de temps et par unité de volume d'air. u , v et w représentent les trois composantes selon les axes x (ouest vers est), y (sud vers nord) et z (vertical orienté vers le haut) de la vitesse du vent qui contiennent l'information sur la composante moyenne du vent ainsi que sur les composantes turbulentes du vent. Ces dernières composantes turbulentes peuvent être fournies par le modèle régional (si sa conception numérique le permet), ou bien peuvent être représentées comme des variables aléatoires fournies par un modèle stochastique à courte mémoire (par exemple un modèle de chaîne de Markov ou de Monte-Carlo). La dispersion des particules dans l'air est causée principalement par les composantes turbulentes du vent.

2.1.4 Les modèles de méso-échelle

Quand on veut étudier un phénomène météorologique précis, il faut d'abord cerner l'échelle à laquelle il se situe et quelles sont les forces importantes en présence. On peut classer les phénomènes atmosphériques selon différentes échelles en se basant sur leurs dimensions spatiales et temporelles. Par exemple, les panaches de chaleur que l'on observe au-dessus de l'asphalte des routes pendant une journée chaude et ensoleillée, lesquels mesurent un mètre et ne durent que quelques secondes, sont classés dans la micro-échelle.

La méso-échelle est divisée de façon arbitraire en trois sous-échelles spatiales. La première, appelée méso- γ , est localisée à 2km au dessus de la couche limite planétaire. Les événements météorologiques qu'on peut observer à cette échelle sont les orages, les ondes de gravité, la turbulence du vent et ses effets urbains. La deuxième, appelée méso- β , correspond à une échelle spatiale de l'ordre de 20 km. Les phénomènes à étudier à cette échelle sont le jet de bas niveau nocturne, les ondes d'inertie, les nuages, les lignes

de pluie et les lignes de grain. En dernier lieu, on trouve la méso- α qui correspond à une échelle spatiale de l'ordre de 200 km avec des phénomènes météorologiques comme les fronts et les ouragans (Stull, 2000).

Dans notre travail, les phénomènes météorologiques modélisés se situent dans la méso-échelle β .

2.2 Modèle météorologique de Méso-échelle (MM5)

Un modèle de méso-échelle est important pour produire un pronostic des paramètres météorologiques tel que le vent, la température, l'humidité et donner les variables importantes et nécessaires pour prédire la distribution spatio-temporelle du pollen. Le modèle de méso-échelle météorologique de cinquième génération (MM5), développé par la Pennsylvania State University et le National Center for Atmospheric Research (NCAR), a été choisi pour cette étude. Il s'agit d'un modèle qui a été mis à la disposition de la communauté scientifique en 1978. Depuis cette date, il a été utilisé pour de nombreuses études météorologiques de diagnostics et pronostiques, et il a été amélioré continuellement. C'est donc un modèle fiable qui a en outre la capacité de fonctionner sur un ordinateur de type compatible PC. Le modèle RAMS (Regional Atmospheric Modeling System), possède des caractéristiques comparables à celles de MM5, mais il nécessite malheureusement un ordinateur plus puissant que le simple PC de bureau utilisé dans le contexte de ce travail.

La modélisation de la couche limite planétaire (Planetary Boundary Layer, en anglais) sélectionnée pour cette étude, appelée MRF, (Medium Range Forecast) ainsi que d'autres options physiques, font du modèle MM5 un outil idéal pour l'étude des caractéristiques de méso-échelle qui peuvent influencer le transport et la dispersion du pollen et d'autres particules.

2.2.1 Description du Modèle MM5

L'implantation du modèle MM5 a été effectuée sur un ordinateur de type compatible PC équipé du système d'exploitation Linux Red Hat version 9 et de la suite de compilateurs Fortran 77 et 90, PGF77 et PGF90, produits par la société Portland Group (PGI). En ce qui concerne la visualisation des variables météorologiques, on a utilisé les logiciels graphiques GRAPH et GRADS du NCAR (National Center for Atmospheric Research).

The MM5 Modeling System Flow Chart

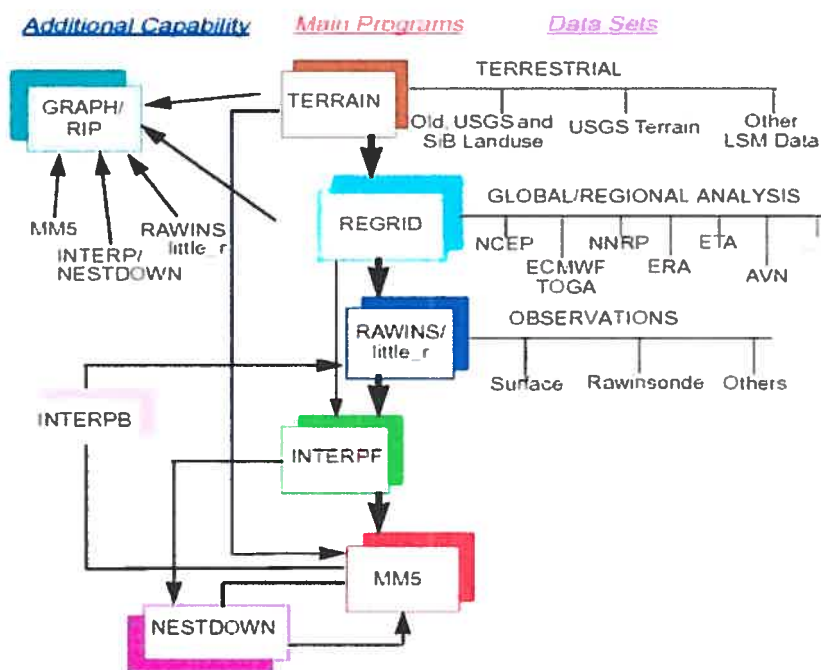


Fig. 2 Description du modèle MM5⁴

Une description du modèle MM5 par un diagramme de flux est donnée sur la figure 2. Les données de topographie utilisées par TERRAIN, un des programmes du système MM5, sont fournies avec les propriétés physiques de la surface comme l'albédo, le

⁴ <http://box.mmm.ucar.edu/mm5/>

pourcentage d'eau disponible en surface, l'émissivité, la longueur de rugosité et l'inertie thermique. Ces données sont fournies par le USGS (United States Geological Survey).

Le deuxième programme s'appelle REGRID. Son rôle est de lire les archives de données météorologiques, d'analyses et de prévisions aux différents niveaux de pression et de faire une interpolation de ces analyses pour fournir le champ d'essai qui fournira les conditions initiales. Les données utilisées pour alimenter ce programme sont issues de l'archive NOMADS (NOAA Operational Model Archive Distribution System).

LITTLE_R est le troisième programme du modèle MM5.

Son objectif est de combiner de façon optimale les champs météorologiques (analyses ou prévisions fournies par REGRID) avec les observations ponctuelles (radiosondages, stations de surface) pour fournir la meilleure approximation possible de la situation météorologique réelle. Dans le langage météorologique, cette procédure est appelée analyse objective.

INTERPF est le quatrième programme. Il prend comme entrée les champs météorologiques sur des niveaux de pressions produits par LITTLE_R ou REGRID, pour fournir les conditions aux limites des frontières du domaine et au niveau de la surface.

Le dernier programme du système MM5 est le modèle MM5 proprement dit qui effectue l'intégration des équations dynamiques en utilisant les sorties des programmes précédents pour fournir les conditions initiales et les conditions aux limites.

Finalement, après avoir fait tourner le modèle MM5, on va obtenir l'évolution temporelle des champs météorologiques nécessaires au modèle Hysplit_4.

2.3 Modèle HYSPLIT_4.

La NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) et le ARL (Air Resources Laboratory) sont les deux organismes qui ont développé le modèle HYSPLIT_4 (Draxler and Hess 1998) qui a été utilisé pour cette étude. HYSPLIT signifie Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory.

2.3.1 Description du modèle HYSPLIT_4

Le modèle HYSPLIT peut être lancé depuis le site Internet de la NOAA ou sur un ordinateur de type PC. Il permet de simuler les trajectoires, la dispersion et le dépôt de particules. Il faut préciser que Hysplit est conçu pour simuler le transport et la dispersion sur de longues distances (supérieures à 200 km). C'est un modèle qu'on appelle hybride parce qu'il utilise, de façon combinée, les deux descriptions classiques du mouvement d'un ensemble de particules : les approches Lagrangienne et Eulérienne. Dans le cadre d'une approche Eulérienne, la variation locale de la concentration à l'intérieur d'une cellule fixe se calcule en intégrant le flux de particules à travers l'interface de la cellule (voir figure 3).

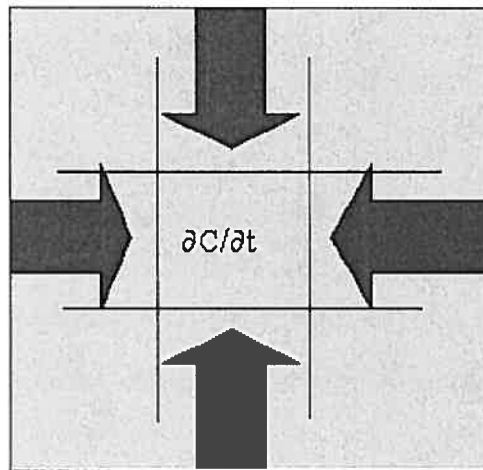


Fig. 3. Approche Eulérienne, dérivée locale, solution pour tout le domaine, idéale pour les sources multiples où $\partial C/\partial t$ représente la dérivée partielle locale de la concentration par rapport au temps.

En revanche, quand on utilise la méthodologie Lagrangienne, on suit le mouvement de chaque particule. Dans ce cas, les concentrations se calculent en additionnant la contribution de chaque bouffée de polluant qui se déplace sur la grille en suivant sa propre trajectoire (voir figure 4).

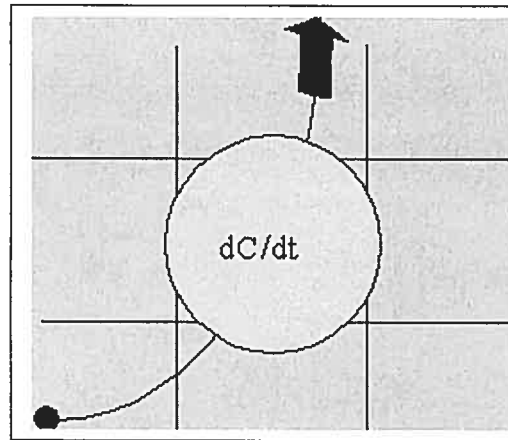


Fig. 4. Approche Lagrangienne, dérivée totale, solution uniquement sous la trajectoire idéale pour les sources ponctuelles. dC/dt est la dérivée totale de la concentration par rapport au temps.

2.3.2 Trajectoires avec HYSPLIT_4

Les calculs de trajectoires et de dispersion sont faits en utilisant une approche Lagrangienne, alors que la prévision de concentrations est sous une approche Eulérienne. La concentration est calculée en chaque point de la grille. Le modèle HYSPLIT_4 utilise la résolution horizontale de l'entrée du modèle. Les données de terrain sont interpolées en suivant un système de coordonnées sigma dans lequel la résolution verticale augmente vers la surface. Le niveau 1 du modèle HYSPLIT_4 est situé à 10 m, le niveau 2, qui est considéré comme le sommet de la couche de la surface, à 75 m et enfin le niveau 3 à 200 m. Au minimum, le modèle a besoin en entrée des composantes u et v du vent, de la température, de la hauteur de la couche limite, de la pression aux différents niveaux et à la surface, des précipitations et aussi des dépôts humide et sec.

2.3.3 Dispersion avec HYSPLIT_4

Dans le modèle HYSPLIT_4, le traitement de la dispersion est basé sur la théorie du Gradient de Transport aussi connue sous le nom de théorie K. Dans le cadre de cette approximation, les processus de diffusion aux échelles non résolues (c'est à dire les phénomènes de turbulence que le modèle ne peut pas représenter explicitement car ils se produisent à une échelle non résolue par le modèle) sont représentés par un terme effectif de diffusion tridimensionnelle.

Pour résumer, on a l'équation suivante :

$$\frac{dC}{dt} = \text{sources - puits} + \text{transport} + K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \dots\dots\dots(2)$$

Dans l'équation ci-dessus, C représente la concentration volumique en grains de pollen (en grains par m³) et K_x, K_y et K_z sont des coefficients de diffusion (exprimés en m²s⁻¹).

2.3.4 Concentration avec HYSPLIT_4

Quand on utilise le modèle de particules, la grille de concentration est représentée par une matrice de cellules. Le volume d'une cellule est défini par les dimensions de la grille et le nombre de cellules. Pour calculer la concentration en polluant dans une de ces cellules, il suffit de considérer toutes les particules situées dans la cellule considérée, d'additionner leur masse et de diviser par le volume de la cellule.

2.4 Sources polliniques

Les observations sur l'écologie de l'*Ambrosia* effectuées en Suisse depuis 1951 ont montré qu'il existe une apparition précoce des phases printanières de développement de la végétation au cours des dernières décennies (Schneitr, 2002). Pendant l'année 2000, le groupe de chercheurs qui se trouve à Genève a été alarmé par un indice d'augmentation annuel du pollen qui peut s'expliquer par une production locale du pollen d'*Ambrosia* à

Genève (Taramarcaz *et al.*, 2005). Ces chercheurs ont effectué une étude de terrain en 2004 qui couvre une superficie totale de 215 000 m² infestée par cette plante annuelle. La carte de la distribution géographique des plants d'*Ambrosia* n'est malheureusement pas disponible pour la période étudiée dans ce travail (Taramarcaz *et al.*, 2005). En l'absence de cette information, il est plus difficile d'identifier les sources. Il est habituellement admis que la plupart du pollen collecté à une station quelconque est d'origine locale (Solomon et Mathews 1978; Keynan *et al.*, 1991; Rantio-Lehtimäki 1994; Campbell *et al.*, Adams Groom ,2002; Damialis *et al.*, 2004). Néanmoins, quand la production locale ou régionale de pollen n'est pas suffisante pour expliquer la quantité de pollen récolté, un transport sur une longue distance est certainement impliqué (Munuera Giner *et al.*, 2002; Gioulekas *et al.*, 2004, Athanasios *et al.*, 2004). Or la distance que le pollen peut parcourir une fois libéré dans l'air est fortement liée aux composantes du vent (Solomon 1984; Hjelmroos 1991; Cour *et al.*, 1999; Munuera Giner *et al.*, 1999; Van de Water *et al.*, 2003, Athanasios *et al.*, 2004). Une partie de notre méthodologie consiste en la modélisation du champ de vent à l'aide du modèle MM5. Les champs de vent ainsi simulés seront utilisés pour calculer des rétro-trajectoires.

2.4.1 Rétro-trajectoires pour localiser les sources

Le transport du pollen est un phénomène complexe influencé par de nombreux paramètres environnementaux (Athanasios *et al.*, 2004 & Solomon et Mathews, 1978; Mandrioli, 1990; Gioulekas, 2004). Cette complexité implique que, souvent, il est impossible de localiser les sources sans ambiguïté (Comtois, 1996).

Nous supposons qu'une particule de pollen est passive et suivra le vent. Sa trajectoire est donc simplement obtenue par intégration à partir du champ de vent. Donc une bouffée («puff») suivant une seule trajectoire ne peut pas représenter la croissance d'un nuage de polluants si on considère que le vent varie horizontalement et verticalement (Escudero *et al.*, 2006). Dans ces situations, la bouffée unique doit être scindée en plusieurs bouffées plus petites qui sont soumises chacune à un vent légèrement différent. Il est fréquemment nécessaire d'attribuer à un polluant mesuré une source localisée dans un endroit

spécifique. Une première approche est de calculer une rétro-trajectoire pour déterminer l'origine de l'air. Bien qu'il ne soit pas rare de voir des sources identifiées par une seule trajectoire, l'incertitude sur la trajectoire est souvent telle qu'elle n'est pas d'une grande utilité.

Une façon de réduire cette incertitude serait de calculer plusieurs rétro-trajectoires en faisant varier la hauteur du récepteur, sa position et l'instant de réception.⁵ Dans notre étude on sait que Lyon est une source très importante selon les différents travaux présentés par Bernard Clot en Suisse et par Michel Thibaudon et Laaidi en France (Clot *et al.*, 2002 et Laaidi *et al.*, 2003).

Pour trouver notre source, la méthode choisie est basée sur l'utilisation de rétro-trajectoires. Les récepteurs ont été placés aux environs de Genève au niveau des 5 stations de mesure du pollen déjà connue, Bernex (46.10° N, 6.05 E:), Avully (46.10 N, 6.00 E), Presinger (46.13 N, 6.15 E), Hôpital (46.11 N, 6.09 E) et Meyrin (46.13 N, 6.04 E).

Pour chaque station, on a trois rétro- trajectoires qui sont placées à différentes hauteurs à 1m, 50m et 500m

Notre analyse s'appuie sur les séries temporelles de concentration en pollen mesurées aux alentours de Genève et discutées plus en détail dans le chapitre 3. Sur la figure 1 (a) (b) du chapitre 3, on observe qu'une concentration de pollen significative est mesurée de 00h00 à 06h00 le 27 août 2001 dans les cinq stations près de Genève. Pour essayer de déterminer l'origine du pollen observé ce jour, on a calculé des rétro-trajectoires pour les 5 stations et pour 3 hauteurs du récepteur (voir fig. 5).

La source suggérée par ces rétro-trajectoires est donc placée dans la région Rhône-Alpes près de Romans sur Isère le 26 août 2001 à 18h00.

⁵ http://www.arl.noaa.gov/workshop/Spring2006/HTML_Docs/backtraj.html

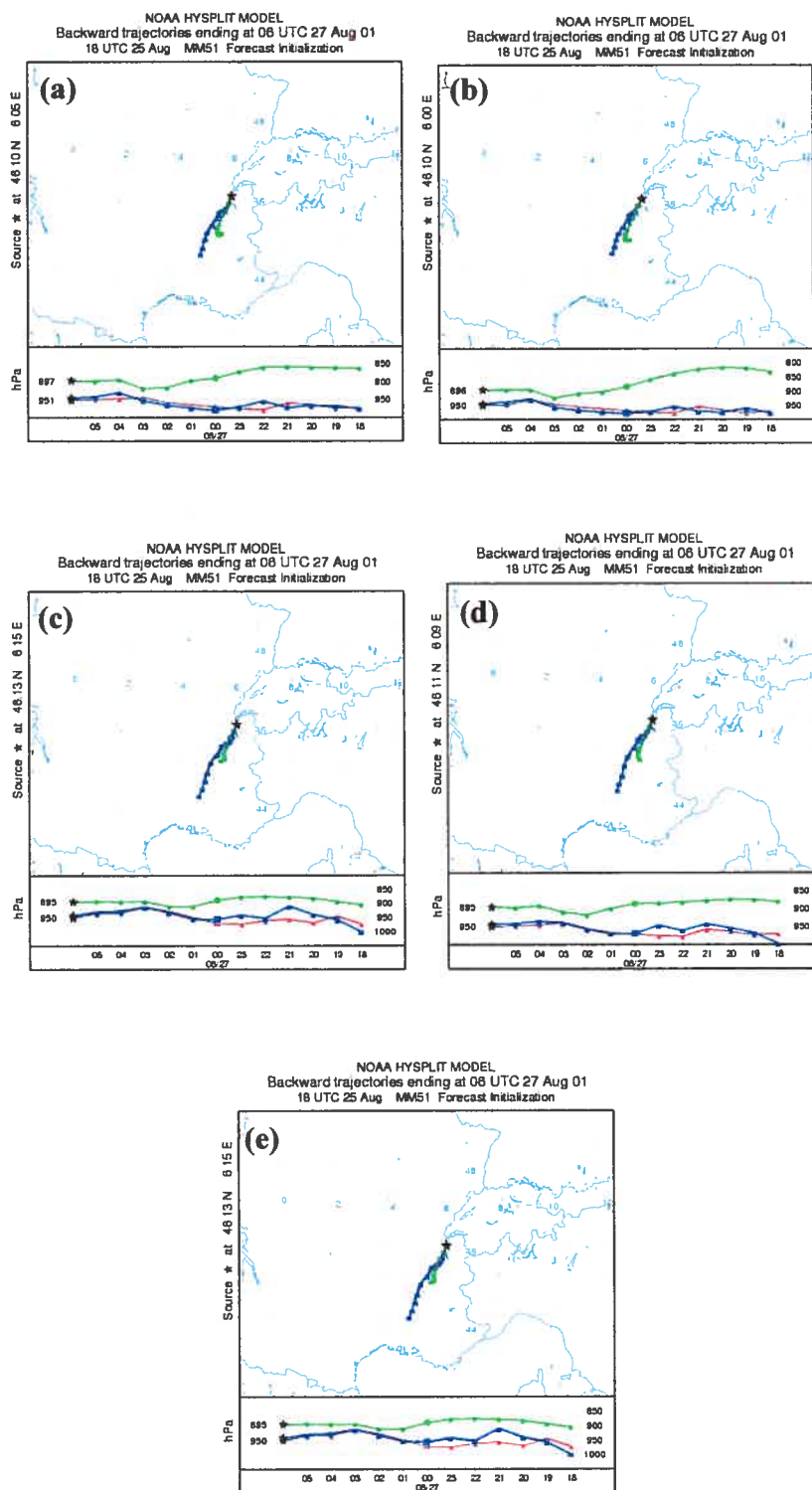


Fig. 5 Rétro -trajectoires (a) Bernex (b) Avully (c) Presinger (d) Hôpital (e) Meyrin
27-08-2001

Pour le 28 août 2001, on peut observer sur la fig. 6 les rétro-trajectoires qui ont commencé le 28 août vers 06h00 le matin et fini le 28 août 2001 vers 00h00. Ces rétro trajectoires suggèrent que l'on peut localiser la source dans la région Rhône Alpes près de Bourg-en-Bresse (trajectoire verte) et les deux autres (trajectoires rouges et bleues) à l'Est de la Suisse. Les cinq récepteurs montrent la même tendance.

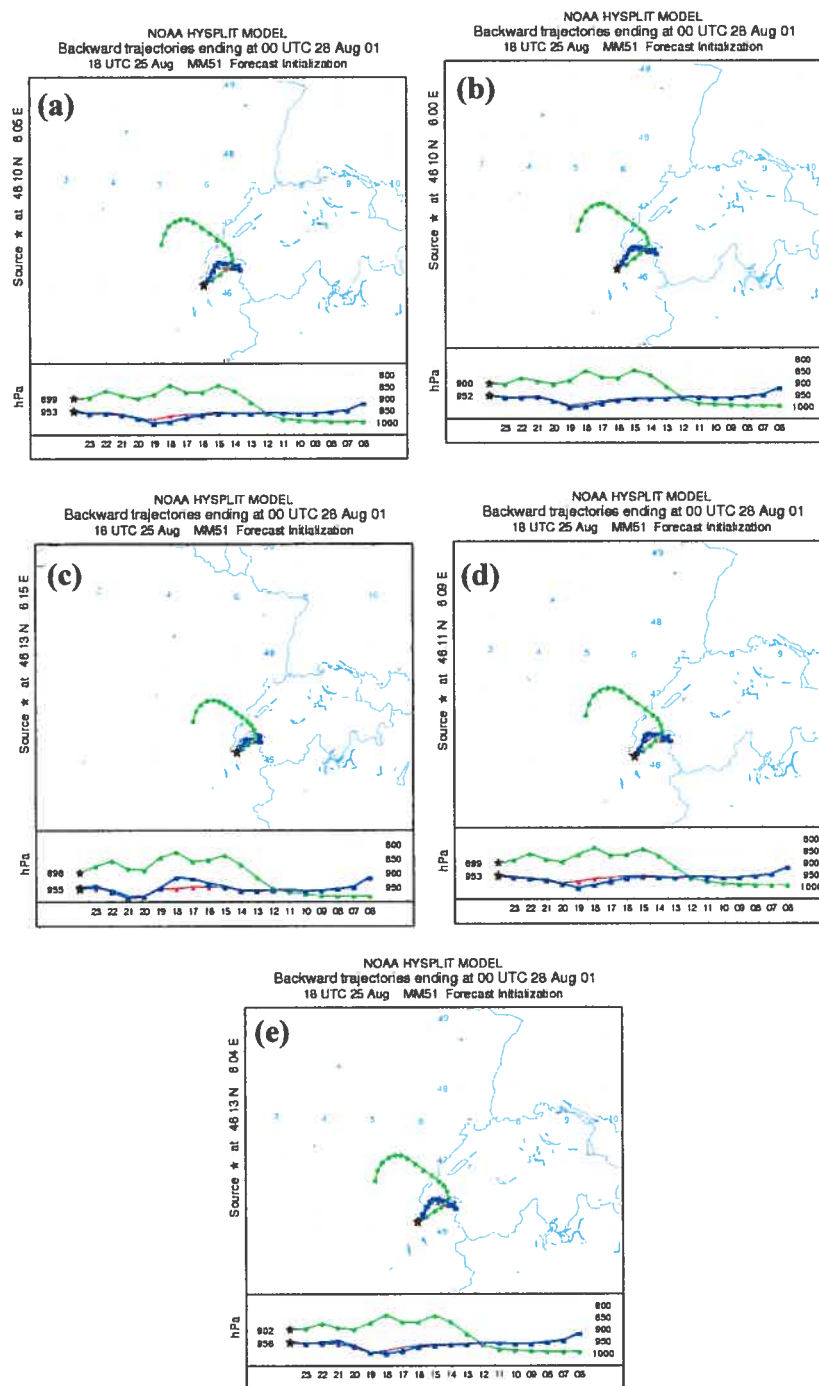


Fig. 6 Rétro - trajectoire (a) Bernex (b) Avully (c) Presinger (d) Hôpital (e) Meyrin 28-08-2001

Pour le 3 septembre 2001, d'après les séries temporelles de concentration pollinique du chapitre 3, on peut observer que les premiers enregistrements significatifs de pollen commencent vers 16h00 pour toutes les stations. On a donc effectué la rétro -trajectoire qui commence le 03 septembre 2001 à 06h00 du matin et se termine le même jour vers 16:00. On peut observer sur la figure 7 représentant ces rétro-trajectoires que les sources peuvent se trouver dans la région Rhône-Alpes entre Roussillon et Romans sur Isère.

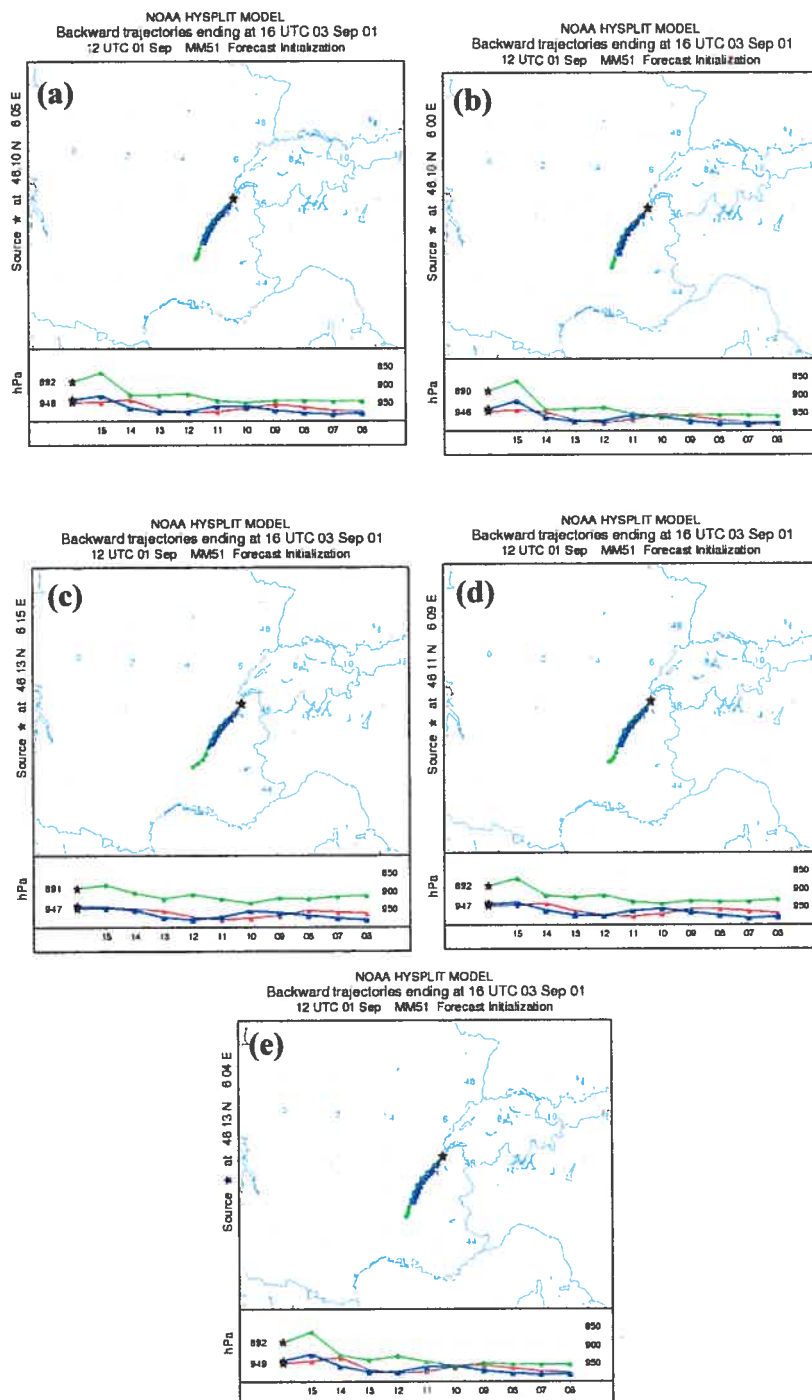


Fig.7 Rétro – trajectoire (a) Bernex (b) Avully (c) Presinger (d) Hôpital (e) Meyrin 03-09-2001

La journée du 4 septembre 2002 est un cas particulier car les séries temporelles de concentration pollinique présentées sur les figures 7 à 11 du chapitre 3 montrent une production locale à Bernex vers 10h00 du matin. Par contre, pour les autres stations les concentrations observées le matin sont faibles. Ce même jour, les concentrations les plus élevées sont observées de 18h00 jusqu'à minuit pour toutes les stations. On a donc simulé notre rétro-trajectoire du 4 septembre 2002 vers 14h00 au 5 septembre 2002 vers 00h00. D'après la figure 8, la rétro-trajectoire suggère donc que notre source peut être placée dans la région Rhône-Alpes près de Lyon et Romans Isère.

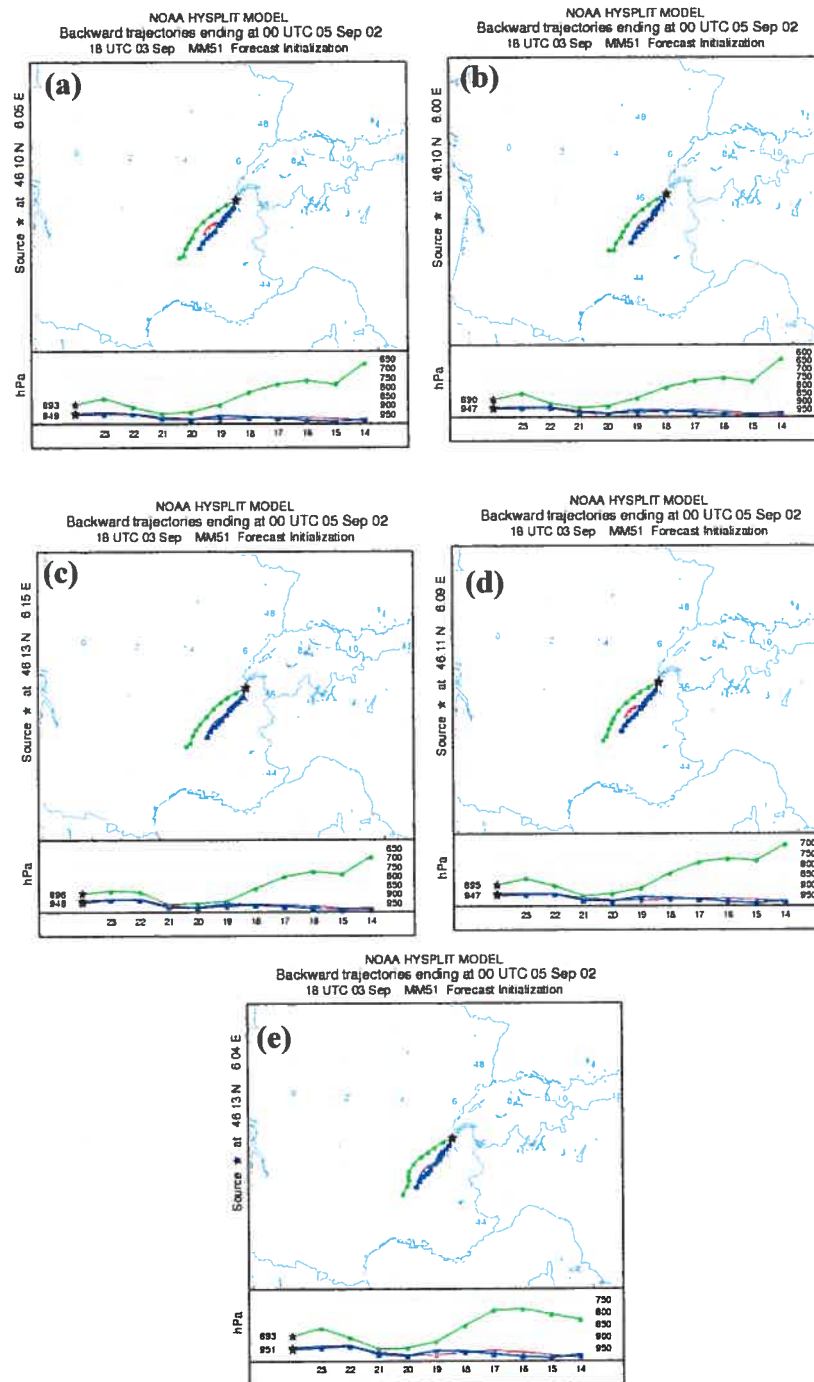


Fig. 8 Rétro - trajectoire (a) Bernex (b) Avully (c) Presinger (d) Hôpital (e) Meyrin 04-09-2002

Pour la journée du 7 septembre 2002, dans toutes les stations on peut observer une concentration élevée vers 20h00. On a donc simulé notre rétro-trajectoire du 7 septembre 2002 vers 20h00 au 8 septembre 2002 vers 04h00. D'après la fig. 9 la rétro - trajectoire suggère donc que notre source peut être placée dans la région Rhône-Alpes près de Roussillon et Romans sur Isère.

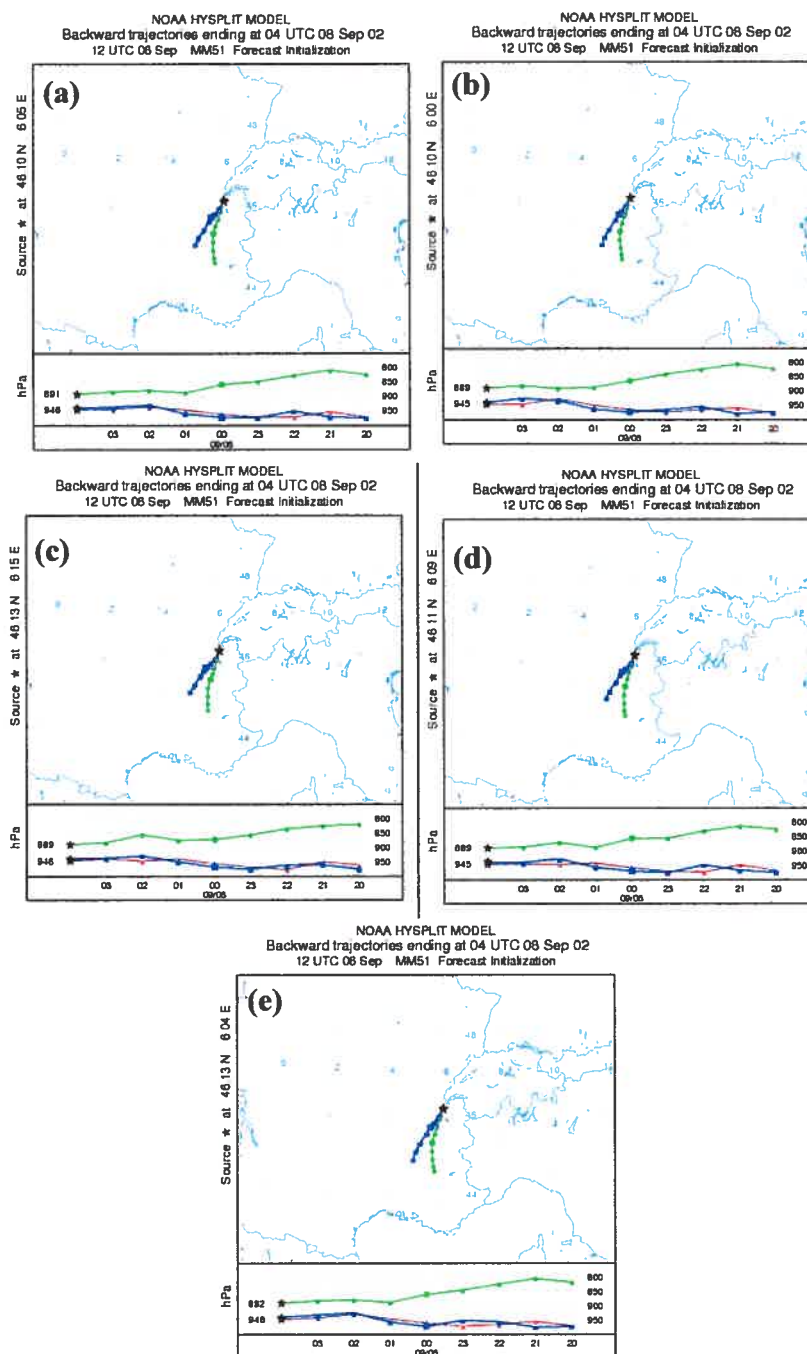


Fig. 9 Rétro – trajectoire (a) Bernex (b) Avully (c) Presinger (d) Hôpital (e) Meyrin 07-09-2002

Pour la journée du 8 septembre 2002, on peut observer une concentration élevée vers 06h00 dans toutes les stations à l'exception de celle de Presinges où pendant toute la journée les concentrations sont nulles. On a donc simulé notre rétro-trajectoire du 8 septembre 2002 vers 08h00 au 8 septembre 2002 vers 18h00. D'après la fig. 10, la rétro trajectoire suggère que notre source peut être placée dans la région Rhône-Alpes près de Roussillon et Romans sur Isère.

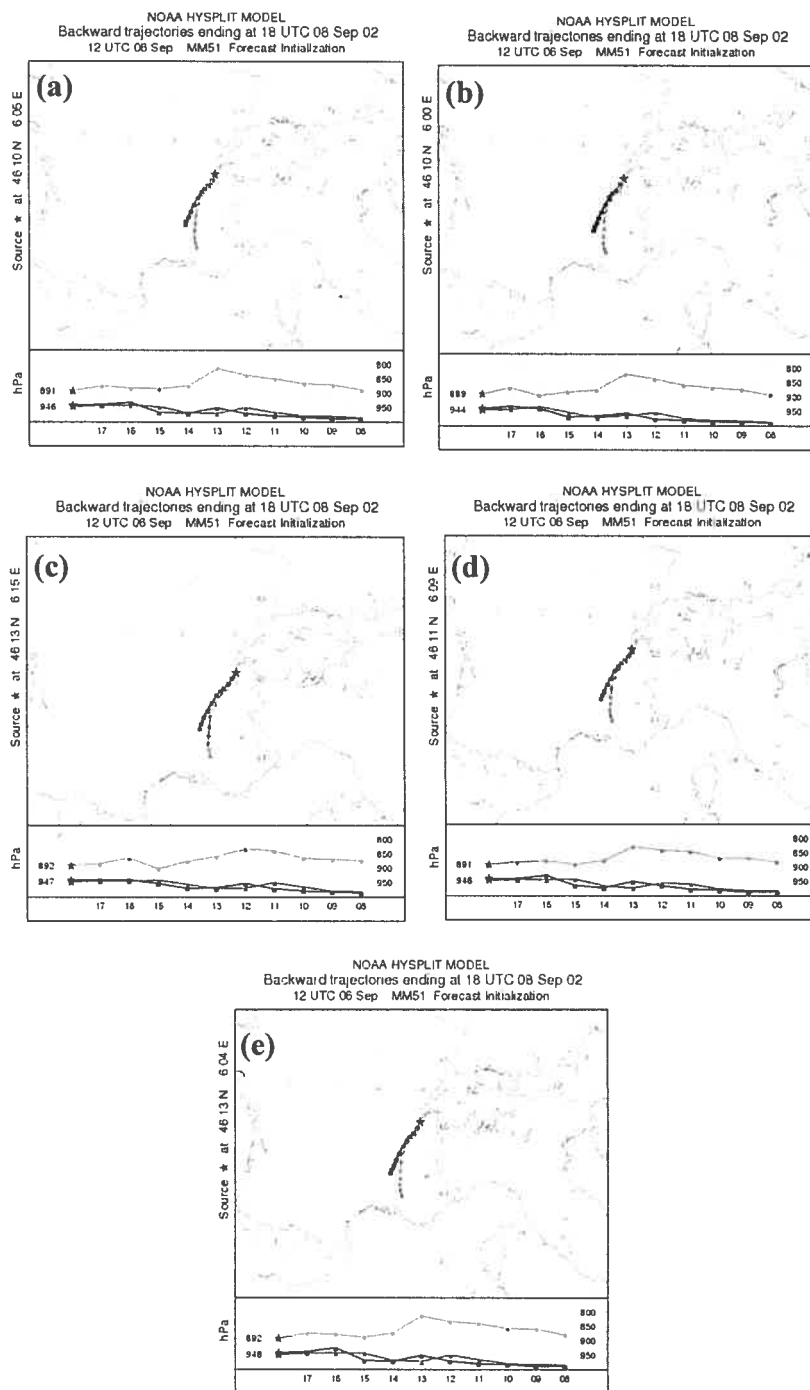


Fig. 10 Rétro - trajectoire (a) Bernex (b) Avully (c) Presinger (d) Hôpital (e) Meyrin 08-09-2002

Pour la journée du 5 septembre 2003, on peut observer une concentration élevée vers 06h00 dans la station de Presinges. Par contre pour le reste des stations les concentrations polliniques sont nulles le matin. On a donc simulé notre rétro-trajectoire du 5 septembre 2003 vers 06h00 au 5 septembre 2003 vers 14h00. D'après la fig. 11, la rétro trajectoire suggère que notre source peut être placée dans la région Rhône-Alpes près de Roussillon et Romans sur Isère.

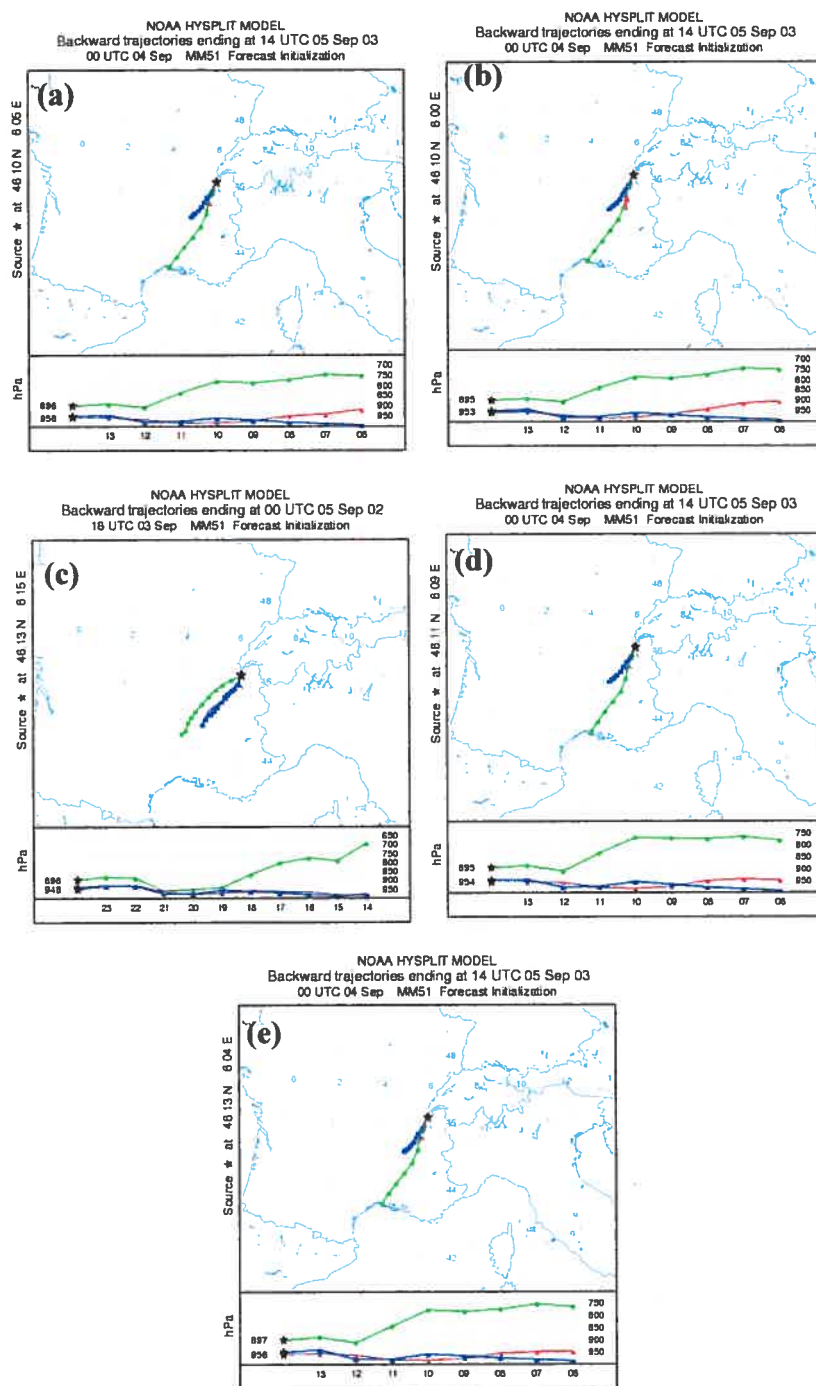


Fig. 11 Rétro – trajectoire (a) Bernex (b) Avully (c) Presinger (d) Hôpital (e) Meyrin 05-09-2003

2.5 Données Polliniques (Ambrosia) et Météorologiques

2.5.1 Collecte des données

La collecte des données polliniques en Suisse est effectuée à l'aide d'un capteur volumétrique de marque Burkard, élaboré par J.M. Hirst. L'appareil est doté d'une girouette qui le positionne face au vent. Les particules aspirées sont impactées sur un ruban de type Melinex enduit d'un adhésif au silicone ou de Gelvatol additionné de gélatine. Pour faciliter leur identification, les grains de pollens sont colorés avec du rouge fuchsine basique. L'analyse se fait par la méthode des 4 lignes longitudinales. Les décomptes polliniques pour chaque période de deux heures sont définis par des lignes sur la préparation.

Par convention, les aérobiologistes placent les appareils à une hauteur comprise entre quinze et vingt mètres. L'emplacement choisi pour installer l'instrument doit être dégagé de murs et de tout type d'obstacle (Guerin, 1993).

Les données aérobiologiques utilisées dans cette étude proviennent du Réseau national de mesure du pollen de Météo-Suisse, pour les stations de Genève (Bernex, Avully, Presingers, Hopital, et Meyrin) et du Réseau National de Surveillance Aérobiologique (RNSA) pour la station de Lyon en France.

2.5.2 Données Météorologiques

Les données météorologiques de Suisse pour les stations de Genève latitude 46.25 N, longitude 6.11 E, altitude 420m proviennent de Météo Suisse.

Les données météorologiques de France ont été fournies par Météo France. Les coordonnées de la station de Lyon sont latitude 45.73 N, longitude 5.08 E, altitude 235m. Toutes ces données ont été mesurées avec une fréquence d'une observation par heure. Les périodes utilisées sont les suivantes : du 25-08-2001 au 05-09-2001, du 03-09-2002 au 08-09-2002, et enfin du 02-09-2003 au 10-09-2003.

2.5.3 Définitions des variables

Les variables météorologiques retenues sont définies par Météo -Suisse et Météo - France en heures (UTC) comme suit :

Table 1 Définitions des paramètres météorologiques

Météo-Suisse- MétéoFrance
Température horaire de l'air à 2 m (°C)
Direction du vent maximal instantané de l'heure (en rose des vents de 360 degrés)
Force maximale du vent maxi instantané de l'heure (en m/s)

Toutes ces données sont fournies à une fréquence horaire.

To be submitted in August 2007 to **International Journal of Biometeorology**

CHAPITRE 3

RESULTATS

A simulation of ragweed pollen transport and dispersion over the Rhone-Alps (France) and Geneva (Switzerland) regions: An episodic case study

Evi Becerra-Acosta ¹

Paul Comtois ¹

Bernard Clot ²

Michel Thibaudon ³

¹ Laboratoire d'aérobiologie Université de Montréal, Montréal Canada; ² Météo-Suisse, Payerne Switzerland; ³ Réseau National de Surveillance Aérobiologique, Lyon, France

Abstract.

The Fifth Generation Mesoscale Model from Penn State/UCAR (MM5) has been used in conjunction with the transport model HYSPLIT to study both: the long-range transport of ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) pollen from the Rhone-Alps region in France into Switzerland and the effects of local ragweed sources in a source-oriented approach. An

insight into the mechanisms responsible for episodes of high concentration in the France-Switzerland region is gained by contrasting 2001, 2002 and 2003 which exhibit different transport characteristics. A series of sensitivity experiments where the location and intensity of *Ambrosia* (ragweed) sources are systematically changed suggests that for 2001 and 2002, the main mechanism that explains most of the concentration diurnal variability is both long-range transport originating from sources located in the Rhone-Alps region and local sources in Geneva, while during 2003 it appears that only local sources in Geneva may play a significant role. For the periods and years considered, the results are consistent with the observed progressive invasion of ragweed in the south-west of Switzerland.

1. Introduction.

The presence and infestation of the American ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) has long been recognized as a major public health problem in Europe, especially in countries such as France, Italy, Hungary and several other eastern European countries where a significant percentage of the exposed population has developed great sensitivity to ragweed pollen (Dechamp, 2002; Laaidi and Laaidi 1999; Carosso and Gallesio, 2000; Yankova *et al.*, 2000; Jager, 2000; Ribnicek *et al.*, 2000).

Changing climatic conditions also play an important role in the earlier pollination periods observed in Switzerland over the past 21 years (Clot, 2003) as well as pollen production. It is now known that under controlled experimental conditions the plant's pollen yield increases up to 61% under CO₂ doubling scenarios (Wayne *et al.*, 2002). Recent studies have also shown how ragweed has been able to colonize northern latitudes in Europe and has adapted to regional climate change scenarios at a much faster speed than expected (Dahl *et al.*, 1999). Furthermore, its progression through Europe has been associated with economic development, transport of contaminated soils deforestation and even warfare which have helped create larger areas of urban and industrial fallow land where ragweed thrives easily (Taramarcaz *et al.*, 2005).

Although in Switzerland the observed ragweed pollen concentrations are, on average, smaller by a factor of 3 to 5 compared to other infested European areas, its steady progression has been seen with alarm because of its potential impact on the public health system (Taramarcaz *et al.*, 2005).

Forecasts of pollen concentrations have been done in one of two ways: a receptor-oriented method or a source-oriented method. Recently, a study in Tuscany Italy to identify the source of ragweed pollen during a 6-year period (1999-2004) showed a strong statistical correlation between daily prevailing wind direction and pollen count. The synoptic weather situation and the path of back trajectories suggest an area around southern Hungary as a possible source of Ambrosia pollen (Cecchi *et al.*, 2006).

In this study, we propose the use of a physically-based meteorological regional model and a particle transport model in a source-oriented approach. The models used in this study are the National Center for Atmospheric Research/Penn State Fifth Generation Mesoscale Model (MM5) and the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model (HYSPLYT_4). This source-oriented approach has been used with success in earlier studies of pollen transport to establish the timing of influx of pollen and to alert the public of the severity of possible hay fever events (Van de Water and Levetin, 2003). A similar method is used by Pasken and Pietrowicz (2005) who show that the combination of MM5 and HYSPLIT_4 can provide short term forecasts for oak pollen.

The accuracy of the source-oriented approach relies on how well the source locations, rates and duration of emission are known and how well the meteorological fields are represented in the study areas. The location of local sources of ragweed for some major Swiss cities such as Geneva has been the subject of several field campaigns conducted by the Swiss Geneva Group of the Swiss Aerobiology Association and some information regarding the location of ragweed sources is available. At the same time, the Rhone-Alpes region, considered here to be the most important source region outside, but near Switzerland, has been the subject of several studies due to the prevalence of pollinosis among the indigenous population (Dechamp, 2002). In order to assess the spatial and

temporal progression of ragweed at a given location one would need to know if pollen measurements correspond to long-range transport of pollen issued from far off sources or rather emitted from local sources. Because of its geographical location, and climatological conditions, Geneva has seen a steady growth in ragweed infestation that in the 80's was consistent with pollen originating and transported mainly from the Rhone-Alpes region. Recent measurements suggest that a significant portion of this growing trend can be attributed to local sources as well (Clot *et al.*, 2002).

The objective of the present study is to test, under different meteorological conditions, the source-oriented approach technique and to gain insight into the relative importance of local versus long-range sources of pollen in the neighboring region of Geneva, Switzerland.

2. Methodology

In applying the source-oriented approach, we have to specify the space and time distributions of the pollen emission sources. This is a complex function that depends, at the same time, on meteorological and biological factors. Here we assume that pollen source emissions are square areas centered at selected sites on the Rhone-Alpes and Geneva regions which, time wise, are represented by a constant emission rate set to start from a given time in the morning and a duration time. Thus, location, emission rate, initial time of release and length of release are the 4 factors that we have at our disposal to “adjust” the final concentrations modeled in HYSPLIT. At this stage of the investigation, a more sophisticated emission model is not warranted since currently, there is no detailed knowledge of a pollen emission inventory either for France or Switzerland. All we have for the moment is information of pollen concentrations at various sites within the region of interest which together with the above “adjusting” procedure allow us to determine a possible emission source region consistent with measured concentrations. The problem of the emission source reconstruction is a very difficult problem in itself due to the non-uniqueness of the sources and that is out of the scope of this investigation. One important goal, however, is to be able to differentiate the episodes

of long-range transport from those in the Geneva area where a five receptor network has been deployed. Admittedly, this simple emission model might miss very important time evolutions caused by the local meteorology (e.g Helbig *et al.*, 2004) but we believe it to be a first step towards the construction of a more robust emission inventory for ragweed in this region.

2.1 The mesoscale meteorological model

The regional atmospheric model MM5 is used here to produce the required meteorological fields at 10km spatial resolution. To that end one single domain comprising most of Western Europe (39°N-52°N, 6°W-14°E) was defined (see Fig. 4a) which included the Rhône-Alpes region and Geneva. The model was initialized via MM5's pre-processing routines (Dudhia *et al.*, 1994) with Reanalysis data from the NOAA Operational Model Archive Distribution System web-site (http://nomad3.ncep.noaa.gov/ncep_data/) maintained by the National Center for Environmental Prediction (NCEP). These data sets were available every 6 hrs at 0000Z, 0600Z, 1200Z and 1800Z. Model runs were initiated from August 15 to September 10 of 2001, 2002 and 2003 to cover the corresponding study periods.

The model vertical configuration had 23 terrain-following sigma levels, with 12 levels in the first 2 km above ground level, and uses the MRF PBL scheme with the model top set at 100 hPa. The choice for the rest of the model physical parameterizations followed exactly those suggested in the MM5 home page training course (<http://www.mm5.com>).

2.2 The transport and dispersion model

To model the transport and dispersion of pollen within the study area the HYSPLIT_4 model developed at the NOAA Air Resources Laboratory (Draxler and Hess, 1998) was used. The HYSPLIT_4 model computes the transport and dispersion of pollen particles combining Lagrangian and Eulerian approaches (see Draxler and Hess 1998 and references therein). The input to HYSPLIT_4 is hourly gridded wind data from MM5's

output files. HYSPLIT interpolates linearly from the MM5's native vertical coordinate to an internal terrain-following coordinate (Draxler and Hess, 1998). Furthermore, an important feature of HYSPLIT_4 is that the user can choose a finer horizontal computational grid where all the transport and dispersion calculations will be performed. In our case we used 1km resolution for this computational grid. This feature allows us to differentiate between receptor sites in Geneva separated at least 1km. In addition to the computational limit (integration wise), there is a limit to the grid spacing that the user can use since the domain has a fixed number of nodes (300x300) and therefore the total grid span is smaller for finer resolution grids.

HYSPLIT is also capable of reading off the computed turbulence kinetic energy (TKE) from MM5's output to compute the dispersion of the pollen plume. This option however was not used in this study and instead HYSPLIT_4 was set to compute its own dispersion factors internally.

Observational Data

We have selected specific days at the end of August and the beginning of September for years 2001, 2002 and 2003 to contrast different meteorological and pollen transport and dispersion scenarios. During those days, little or no precipitation in the study area occurred and pollen counts were the highest for the entire August-September periods. To better distinguish transport events we have used bi-hourly pollen data from the Rhone-Alpes region at Lyon (45.72 N, 4.9 E), Roussillon (45.38 N, 4.83 E) and five pollen receptor stations in Geneva, Avully (46.1 N, 6.05E), Bernex (46.1 N, 6.05 E), Hôpital(46.11 N, 6.09 E), Meyrin(46.13N, 6.04 E) and Presinges (46.13N, 6.15E) (see Fig.1). Wind data was recorded at station Geneve Cointrin (46.25 N, 6.117 E).

In the following sections, we discuss the observational data for each year.

2.3.1 Year 2001

Here we show data from Geneva and Lyon, as data from other regions in the Rhone-Alpes were not available for this period. Figures 1 (a),(b) show the time series of pollen concentrations for Lyon France, and five receptor stations in Geneva (Avully, Bernex, Hôpital, Meyrin and Presinges). On days 25, 26 and 27 of August significant pollen counts over 50 grains/m³ were recorded at Lyon between 8 AM and 10 AM. On the Geneva receptor sites, pollen counts peaked between 2 PM and 4 PM of day 27, suggesting the possibility of long-range transport, since it is unlikely that pollen would be emitted locally in Geneva this early in the morning. At Geneva also, the wind direction for day 27 early in the morning shows a well defined northwesterly mean component of about 280° (see Figure 1c). A significant pollen event was also detected on August 30 from 6 to 10 AM at the Bernex station. At the other 4 stations in Geneva these events were negligible or not measured at all. In all likelihood, this particular event was local to the Bernex site (compare similar peaks produced on the 31 of August and September 4th in Figure 1a). Following these events, other more significant events occurred between days 3 and 4 of September. Here all of the stations in Geneva recorded the event with counts larger than 50 grains/m³ and with a maxima at Meyrin (240 grains/m³) and Hôpital (150 grains/m³). During this period the recorded wind direction was on average from the southwest (about 250°).

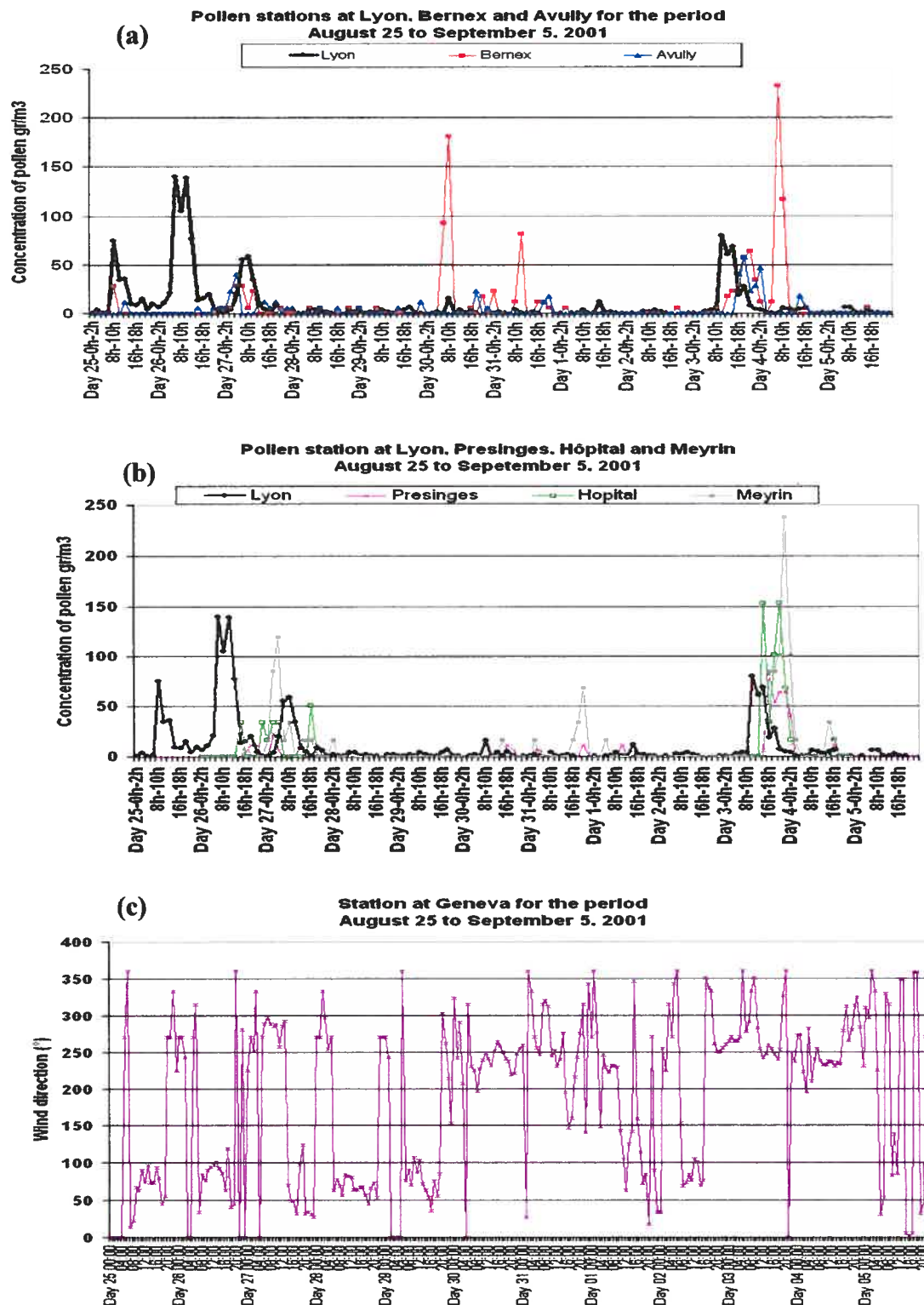


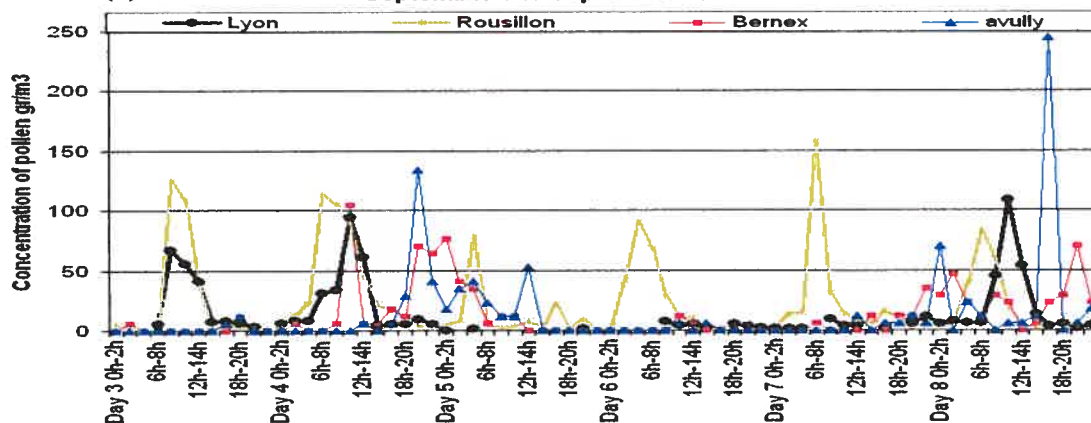
Figure 1. (a) Time series of pollen concentrations (grains/m³) for period 25-August of 05-September 2001 at Lyon and Bernex and Avully , (b) Lyon, Presinges, Hôpital Meyrin, and (c) time series of wind direction (degrees from north) at Geneva

2.3.2 Year 2002

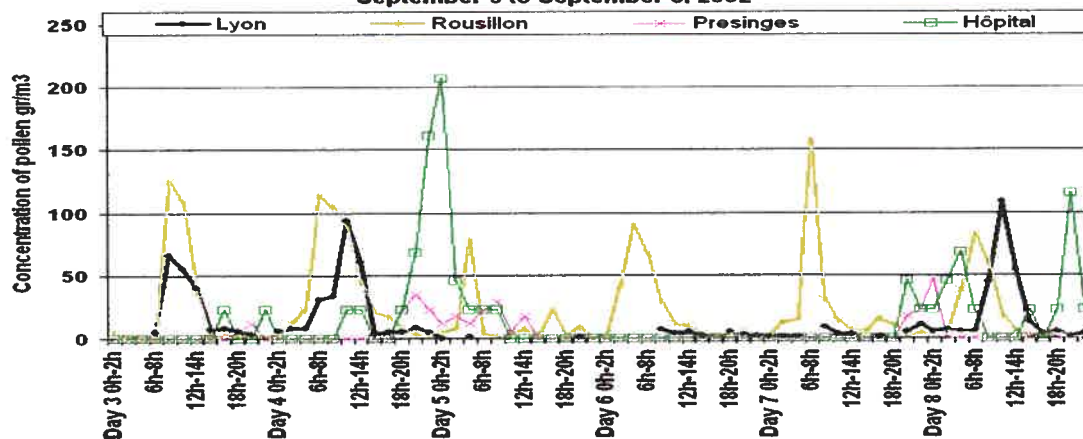
For 2002 we examined the period, from September 3 through September 8. For these years, we include the time series of pollen concentration for both Lyon and Roussillon stations, as they are both available for this period. We note that in these two series, the morning maxima are always reached between 6h and 12h AM. This behavior is clearly evidenced by the time series at Roussillon which shows a remarkable periodicity in the timing of the maxima consistent with previously known emission behavior (Comtois, 1995, <http://www3.sympatico.ca/alarie/ambrosia/expert1.htm> CAREPS Centre Rhône Alpes d'Epidémiologie et de Prévention Sanitaire et l'Association pollen, <http://www.ambroisie.info/docs/Rapport%20ambroisie%201998.pdf>). The time series for Lyon does not show this behavior probably because on days 5 and 6 of September there was appreciable precipitation (not shown) which could have diminished pollen counts for Lyon.

Figures 2(a) through 2(c) show the time series of the 5 stations in Geneva in exactly the same way as in the previous section 2.3.1 for year 2001. There are significant peaks (larger than 50 grains/m^3), or even larger than 200 grains/m^3 , during the transition of one day to the next. Apart from peaks occurring at normal emission hours between 6am and 12 am (see for instance days 4 and 5 for Bernex and Meyrin in Figs. 2 (a) and 2(c) as the two most significant peaks) we note two major events of pollen counts. The first took place during the transition between days 4 and 5 and was detected by all stations, with the largest count registered at the Hôpital station (about 200 grains/m^3) between 0 and 2 am. The wind direction (Figure 2(d)) recorded between 0 and 4 am changed from northeast (about 50°) to southwest (about 250°). Smaller secondary peaks were recorded later in the evening at Avully and Presinges. The second event was recorded late in the evening of day 7 and the early morning of day 8 with counts between 50 and 75 grains/m^3 . An even bigger peak was recorded later in the evening of day 8 with peaks reaching up to 250 grains/m^3 (see Figs. 2 (a), (c)). The wind direction recorded during this second event was on average from the southwest (about 250°) with occasional shifts from the northwest and northeast (Figure 2 (d)).

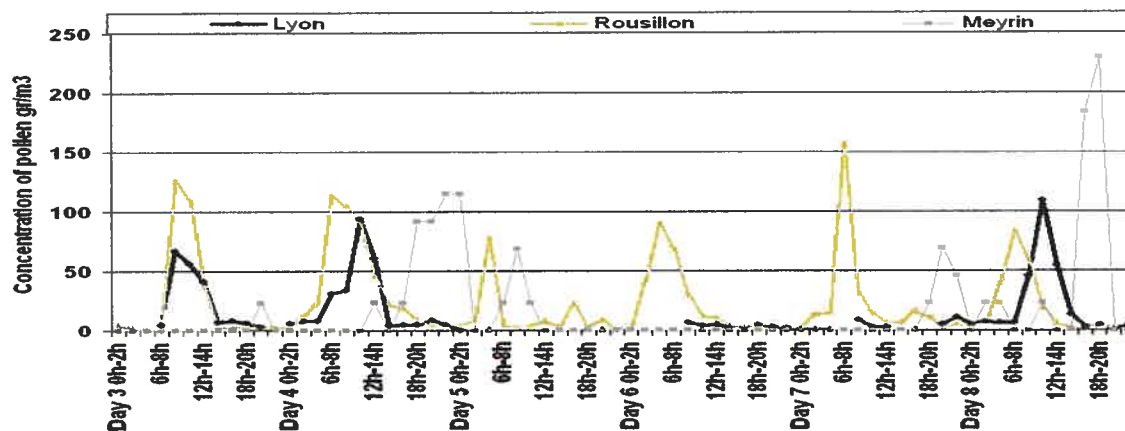
(a) Pollen stations at Lyon, Rousillon, Bernex and Avully for the period September 3 to September 8, 2002



(b) Pollen stations at Lyon, Rousillon, Presinges and Hôpital for the period September 3 to September 8, 2002



Pollen stations at Lyon, Rousillon and Meyrin for the period September 3 to September 8, 2002



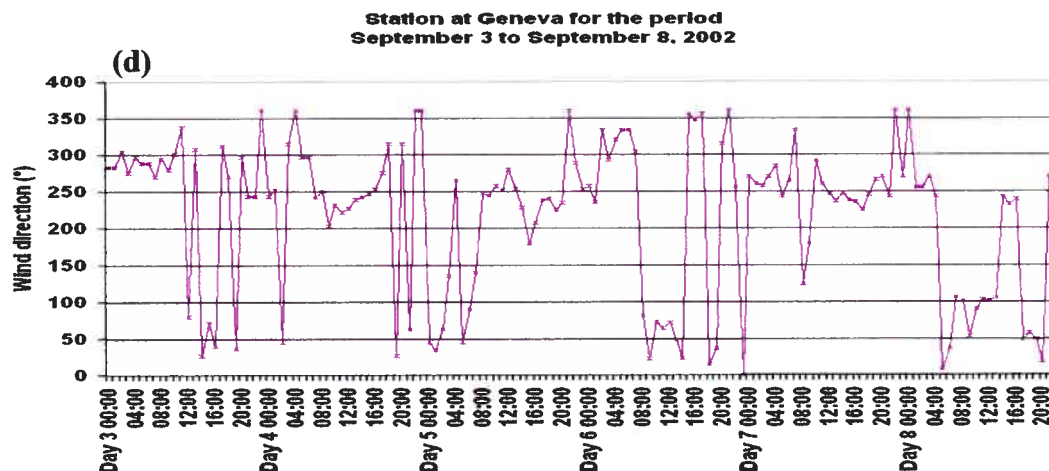
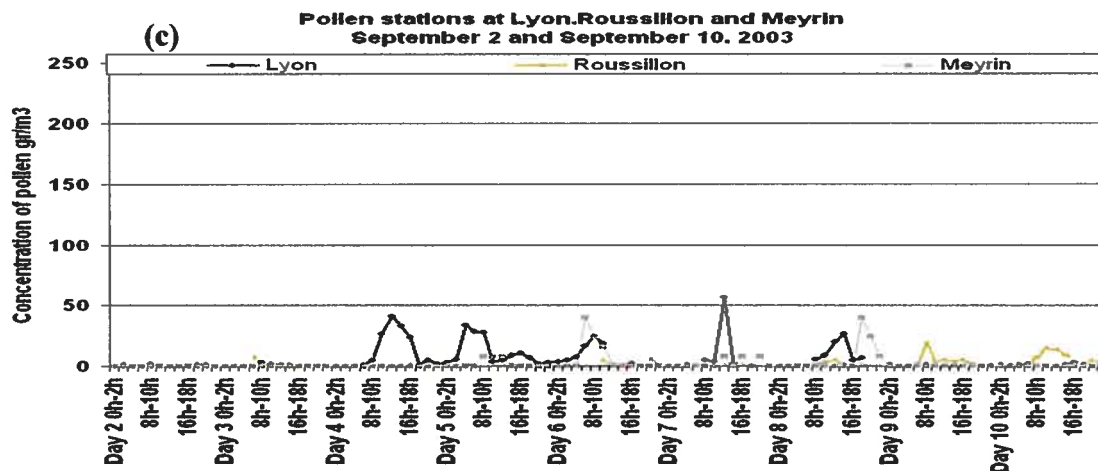
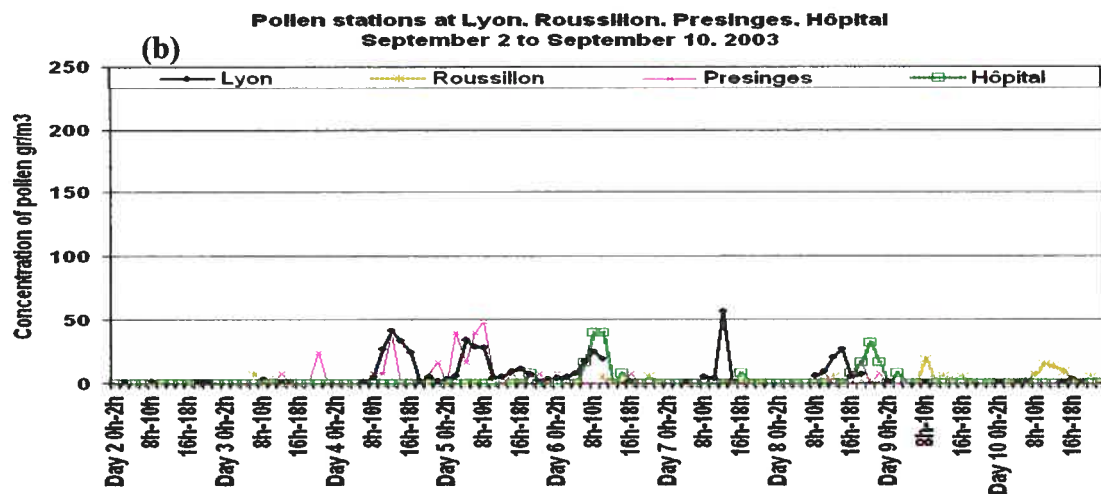
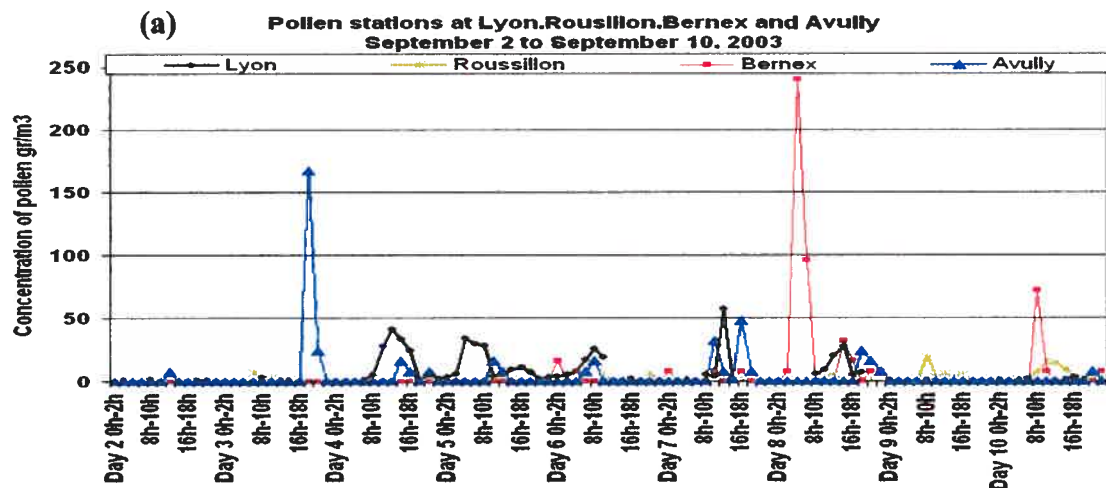


Figure 2. (a) Time series of pollen concentrations (grains/m³) for period 3-September of 8-September 2002 at Lyon, Rousillon, Bernex, Avully, (b) Lyon, Roussillon, Presinges, Hôpital, (c) Lyon, Roussillon, Meyrin and (d) wind direction.

2.3.3 Year 2003

Two large peaks in pollen counts were measured from September 2nd to September 10th. The first at the Avully station on September 3 around 8 pm measured about 168 grains/m³ and the second was measured at Bernex on September 8 around 6 am which measured 240 grains/m³ (Figs 3a-3c). The rest of the time series for all stations in France and Geneva shows peaks that never exceeded 60 grains/m³ in opposition to 2001 and specially 2002 where pollen maxima were always larger than this value. So in this sense, 2003 could be classified as the least active year for pollen followed by 2001 and finally 2002 which was by far the most active year.

Wind data for the concentration maximum on day 3 between, 6pm and 8pm, shows a wind component that shifted from the northeast to southwest component. For the second maximum on day 8, winds from the southwest were recorded (Fig.3d). Given the large amounts of pollen measured on these two days and the small amounts recorded in Lyon and Rousillon, it is difficult to assert that these two events are caused by long-range transport since they could either be the product of pollen re-suspension in the late hours or possibly another source in the Rhone-Alpes.



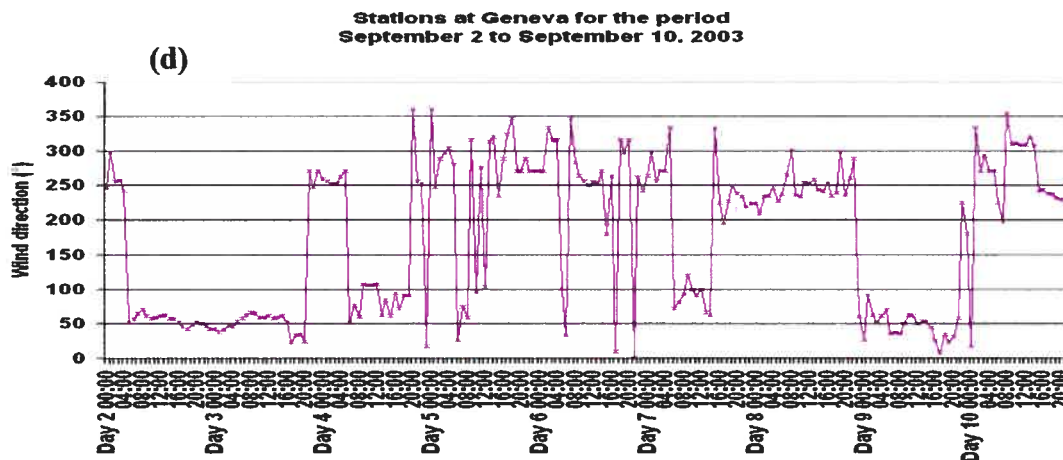


Figure 3 (a) Time series of pollen concentrations (grains/m³) for period 02-September of 10-September 2003 at Lyon, Rousillon, Bernex, Avully, and (b) Lyon, Roussillon, Presinges, Hôpital and (c) Lyon, Roussillon, Meyrin and (d) wind direction.

2.4 Synoptic conditions and wind modeling

In this section we show the simulation that was outputted by the MM5 model when forced by synoptic conditions that prevailed during the periods mentioned in sections 2.3. The model used initial conditions from the NCEP global reanalysis at 2.5°x2.5° spatial resolution (about 300km by 300km) and “downscaled” the meteorological fields to a finer resolution of 10km by 10km.

2.4.1 Year 2001

Here we show the synoptic circulation from the model simulation for the 27 of August at 0000Z and the 3 of September at 0000Z since, as we showed in section 2.3.1, these correspond to the dates of larger pollen concentration events within this period. Figures 4a and 4b show the near- surface wind field and sea level pressure fields for these 2 dates respectively. For August 27 we note that over Western Europe the circulation is dominated by an anticyclone and a trough tilted northwest over Northeast France and Germany. The model develops a northerly low-level jet that flows from the Gulf of Lion along the Rhone-Alpes valley. Thus emissions from sources located closer to the jet, in

the model domain, are more likely to reach Geneva. That this is indeed the case will be shown in section 3, when the sources of pollen within France will be considered. For September 3 the low-level jet has veered to the west towards the Massif Central limiting the chances of pollen being transported from the south to Geneva.

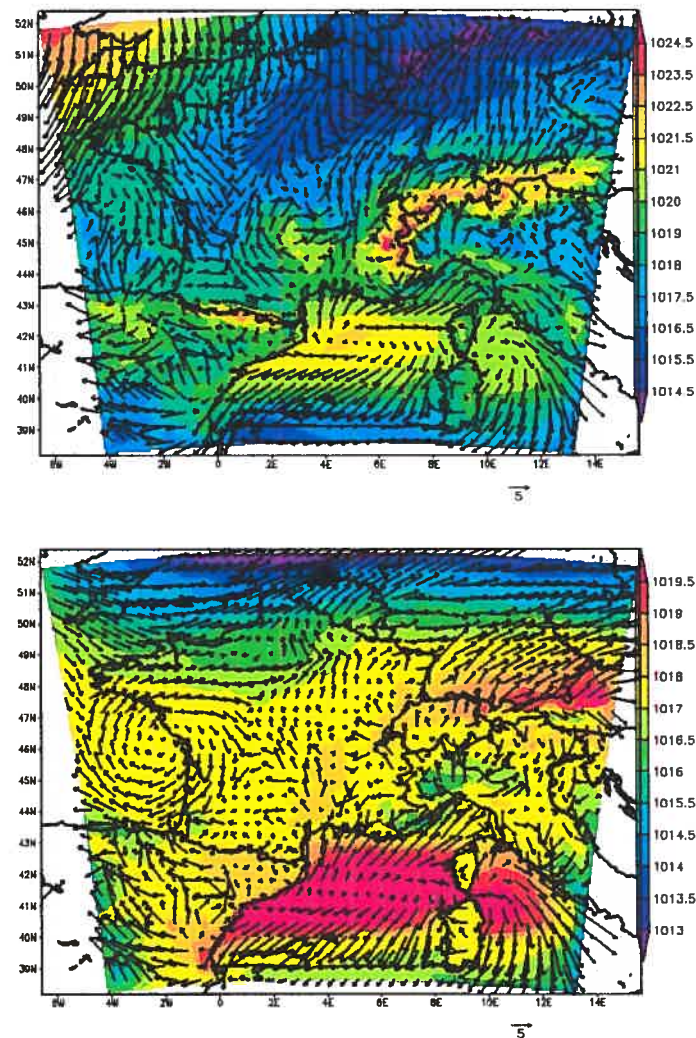


Figure 4a. Upper panel: Upper panel Surface wind (m/s) and sea level pressure fields (mb) from MM5 for August 27, 2001. Lower panel same but for September 3, 2002

2.4.2 Year 2002

For September 4 at 0000Z the reanalysis shows a northerly wind component while the model develops a southerly wind circulation over the Rhone Valley (see Fig. 4b). On the north of France there is a trough in the reanalysis which is not so well developed in the model simulation. On September 9 we verify that the wind circulation has reversed once again in both model simulation and reanalysis (not shown). Therefore the condition for transport of pollen around this time can be severely limited for sources in the Rhone-Lyon region (Fig. 4b)

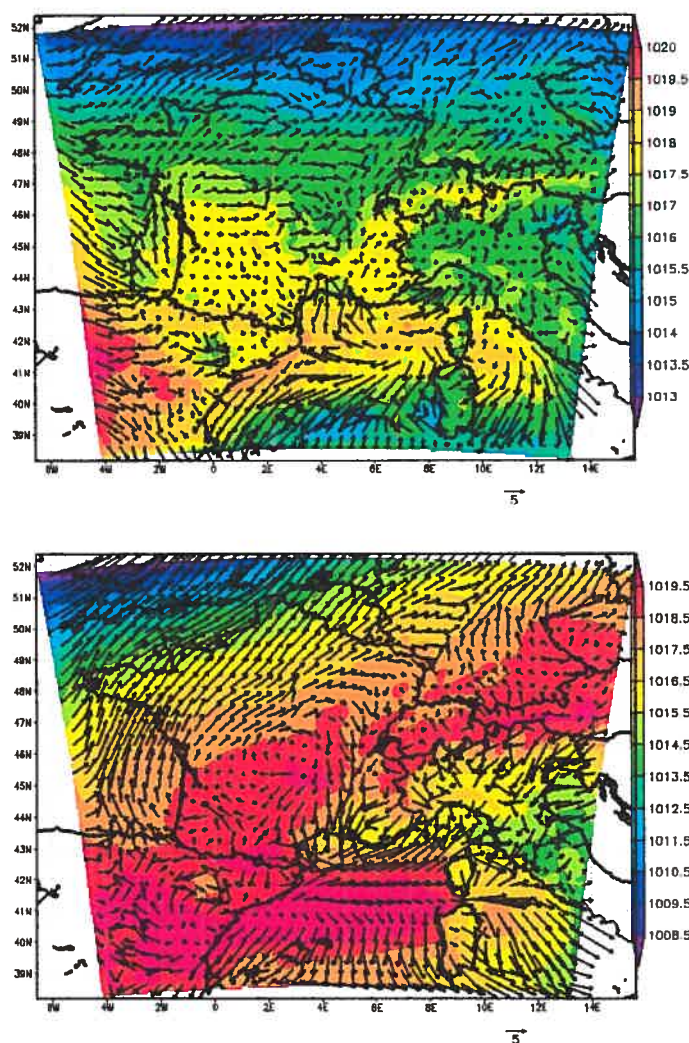


Figure 4b. Upper panel: Upper panel Surface wind (m/s) and sea level pressure fields (mb) from MM5 for September 4, 2002. Lower panel same but for September 9, 2002

2.4.3 Year 2003

For this year only one event has been examined on September 5th. A low pressure system is installed on the west of France which causes a southerly wind over the Rhone Valley. This large scale feature forces south-westerly wind over the Gulf of Genoa on the west flank of the Alps. Emission sources must then be located to the south if any pollen is to reach Geneva from the Rhone Valley. However there is also a possibility of transport of pollen originating in Italy as can be seen from the wind distributions.

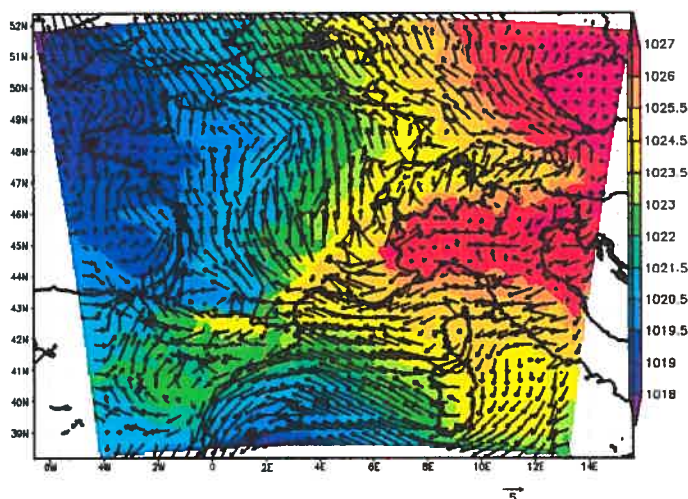


Figure 4c. Surface wind (m/s) and sea level pressure fields (mb) from MM5 for September 5, 2003.

3. Pollen sources and dispersal

There are no known emission inventories for ragweed over our domain of study. Our best guess is based on pollen concentrations measured on a daily basis, such as those shown in section 2.1 through 2.3. This observational data and the back-trajectories from HYSPLIT_4 (not shown) suggest that long-range transport and dispersion of pollen particles are possible if emission sources were located about 100 or 200 km southeast of

Geneva in the Lyon and/or Roussillon regions. Emission sources near, or in Geneva, are also possible, since very high values have been measured in the morning.

We can therefore compose different emission scenarios by locating areas of emissions in these two regions. We have chosen emission areas of 10km x 10km centered on Geneva (46.1 N, 6.1 E) to simulate the near-source emissions at the receptor stations in Geneva. The transport and dispersion experiments performed with HYSPLIT_4 at these sites will be labeled EXP1. The far-source regions in France were defined as 30km x 30km areas at four sites: Roussillon (EXP2), Romans sur Isère (EXP3) and Lyon (EXP4) (see Fig 5 and Table 1 for location of sources). It is assumed here that there is a uniform plant density for the French emission sources of about 90 million plants in each of these (30 km x 30 km) regions. Since each plant is capable of releasing about 50000 grains/hr (Comtois pers.comm.) we have prescribed 4.5×10^{12} grains/hr as the total emission flux rate of pollen for each of these French area sources. For the Geneva region we have assumed a smaller plant density with 200000 plants in a (10 km x 10km) area sources in Geneva and the emission rate was set at 1×10^{10} grains

Table 1. Sources and dates of simulated release

	2001	2002	2003
EXP1	26-08-05:00 EST ‡	04-09-07:15 EST†	
Local**	27-08-05:00EST†	07-09-07:15 EST†	05-09-0400EST†
(46.10N 6.10E)	03-0911:30 EST†	08-09-09:00 EST†	
EXP2	26-08-09:30EST ‡	04-09-09:00EST†	
Roussillon*	27-08-05:00EST‡	07-09-09:00 EST‡	05-09-0400EST‡
(45.38N 4.83E)	03-09-08:00EST†	08-09-09:00 EST‡	
EXP3	26-08-09:30EST†	04-09-09:00EST†	
Romans sur	27-08-05:00EST‡	07-09-09:00EST†	05-09-06:00EST†
Isère*	03-09-08:00EST†	08-09-09:00EST†	
(45.10N 5.10E)			
EXP4	26-08-08:00EST ‡	04-09-09:00EST‡	
Lyon*	27-08-05:00EST‡	07-09-09:00 EST‡	05-09-0400EST‡
(45.71N 4.09E)	03-09-08:00EST‡	08-09-09:00 EST‡	

*emission rate 4.5×10^{12} ; area 9×10^8 , **emission rate 9×10^{10} ; area 1×10^8

† Significant pollen concentrations from transport, ‡ not significant pollen concentrations from transport at Geneva

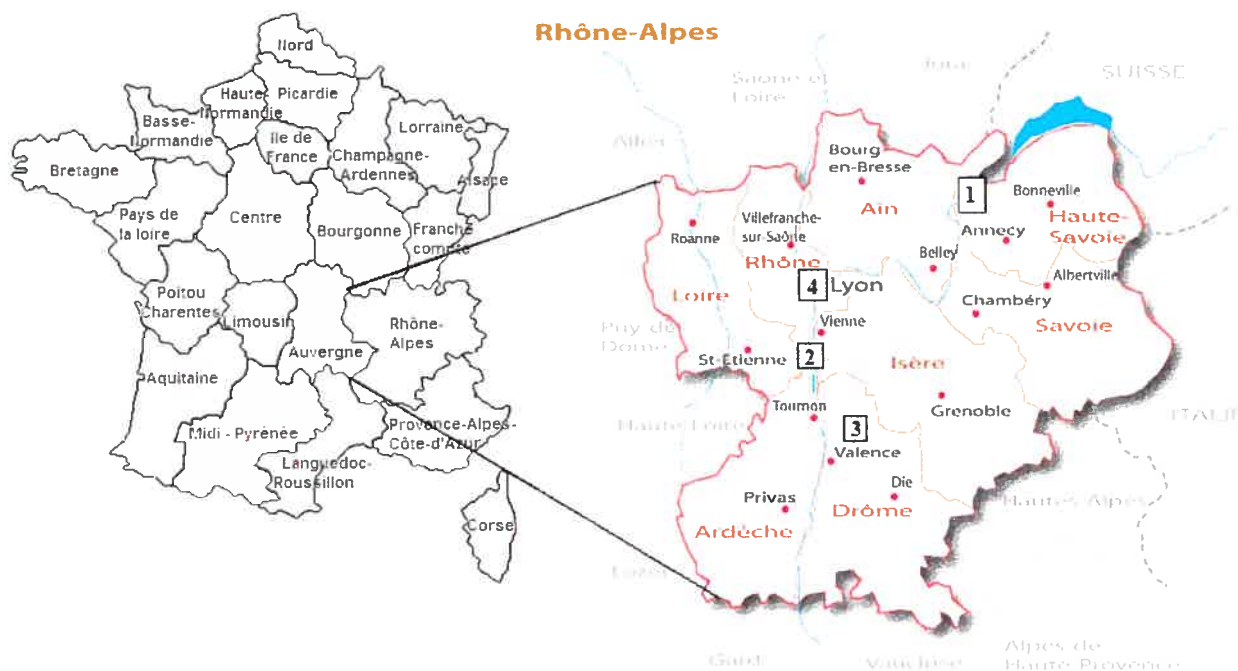


Fig. 5 Source location

Table 1 shows the location, emission rates, time and length of release which are the same for both Lyon and Geneva. As mentioned above, we work under the premise that the above pollen emission rates reflect a spatial and temporal average which is consistent with the levels of infestation observed in the two areas (Geneva and France). However we are neglecting the information on the variability in space and time of these pollen emissions.

Results

3.1.1 August 26 and 27, 2001.

In this section we present the results of the transport and dispersion of pollen under the different emission scenarios proposed above. Figure 6(a) shows the modeled versus the observed concentrations of pollen at the receptor sites in Geneva. The model predicts peaks at more or less the same time than the observed although it underestimates the

magnitude and misses the late peaks on day 27. In this case, only the EXP1(source at Geneva) was capable of producing a model concentration of similar order of magnitude. EXP3 showed small concentration values compared to observation even though it clearly reached Geneva in the evening of the 26 (Fig 6b). The time series of experiments EXP2 and EXP4 showed zero modeled concentrations at these receptor sites.

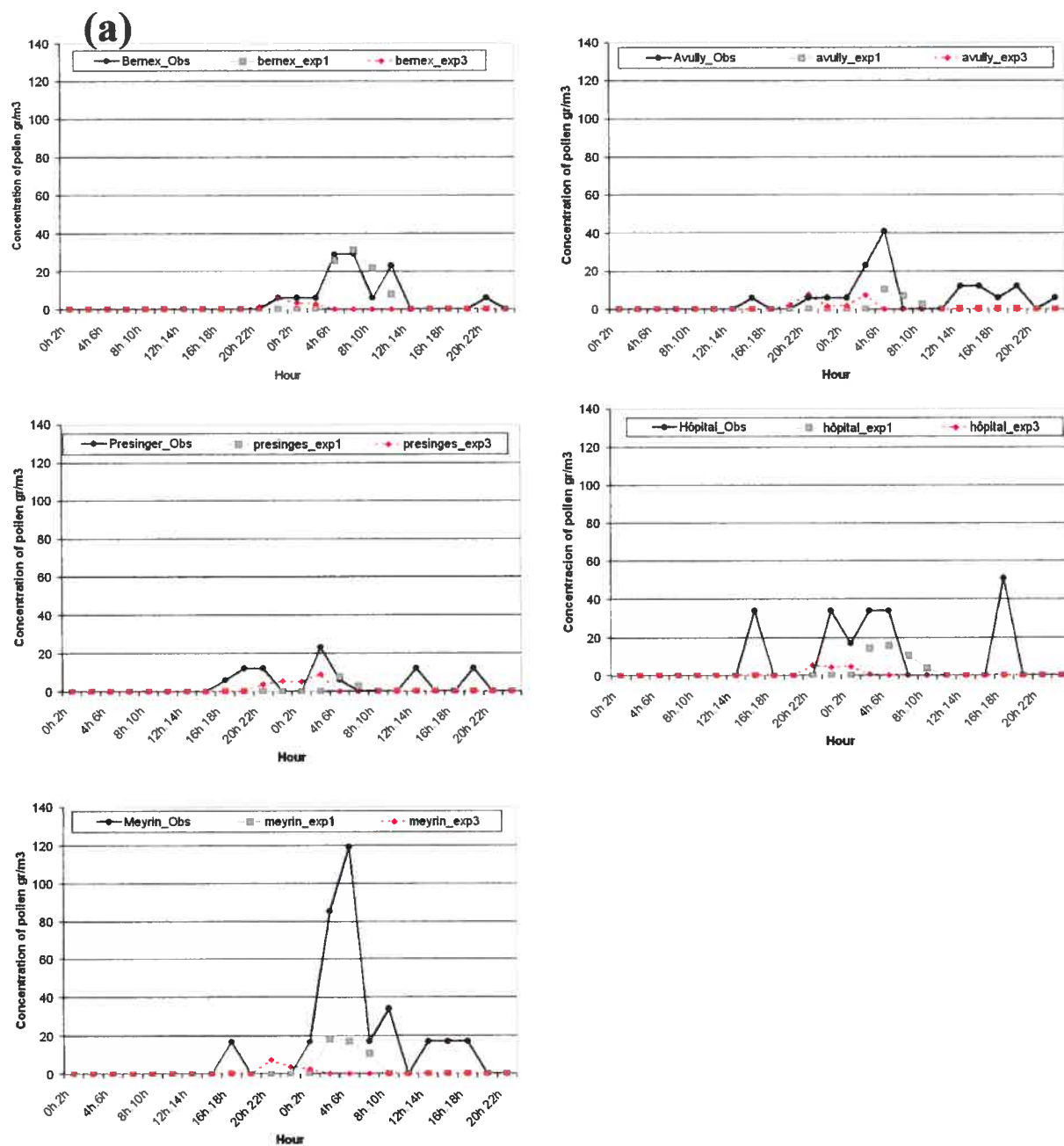


Figure 6(a). Time series of observed and modeled pollen concentrations at the 5 receptor

sites: Bernex, Avully, Hôpital, Presinges, Meyrin. Also shown is the modeled time series for each proposed experiment for August 26 and 27, 2001.

This behavior can be explained to some extent by the time evolution of the concentration maps. Figure 6(b) shows 3 time snapshots of the concentration for the case EXP3 (source at Romans sur Isère). As we commented earlier, given the associated circulation of a low southerly jet this scenario is more probable than one where the source is at Lyon (EXP4) or at Roussillon(EXP2). In other words, we require a source sufficiently close to the jet's core which is between 5° and 5.2° E. This analysis suggests that Romans sur Isère can be one such source of pollen.

(b)

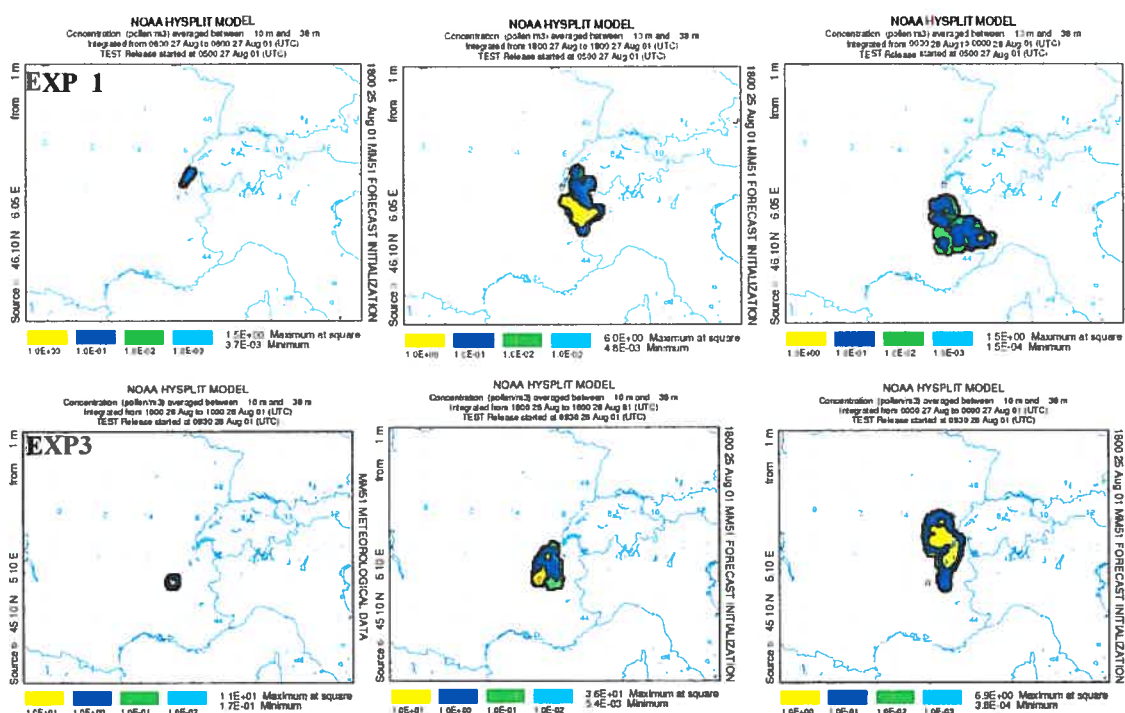
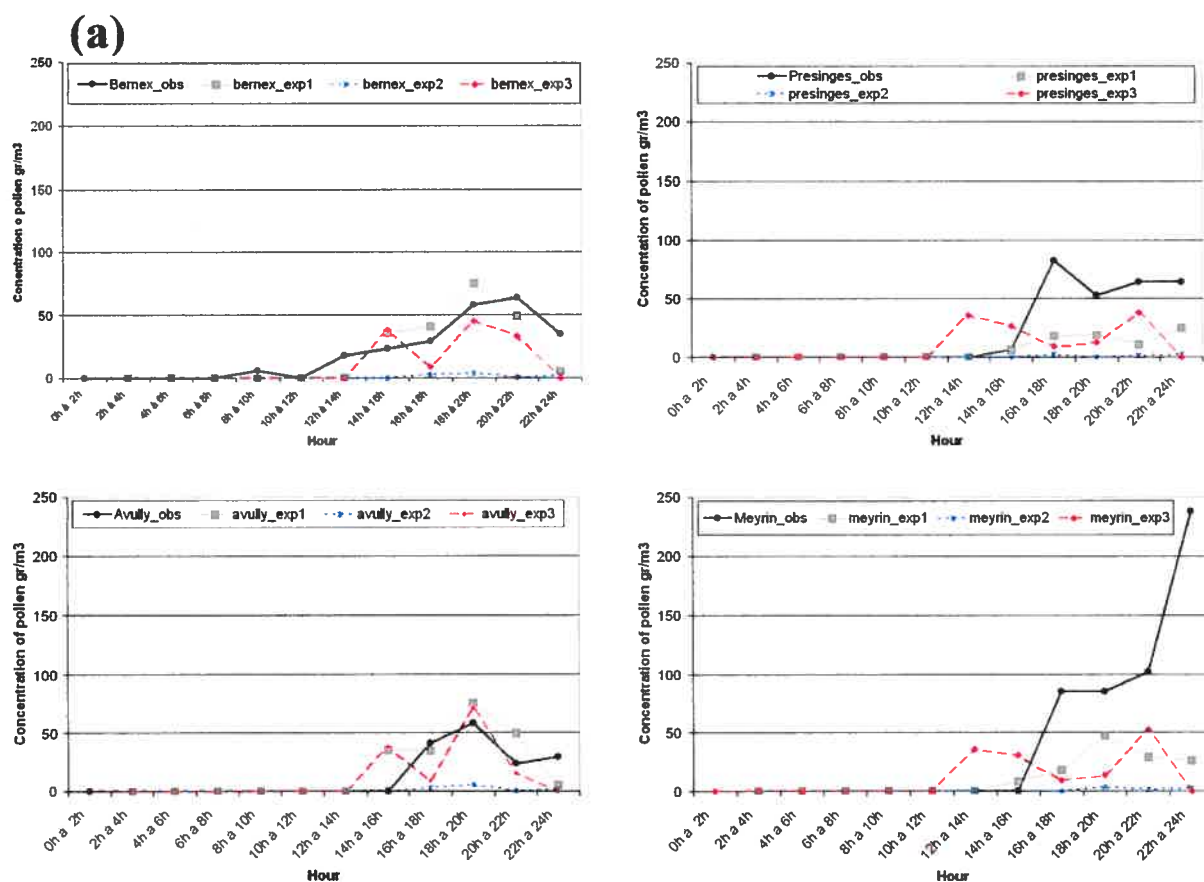


Figure 6 (b). Concentrations of pollen at 3 different times from left to right: August 26 1000Z, August 26 1800Z and August 27 0000Z for EXP3 and EXP1 August 27 0800Z August 1800Z and August 28 0000Z, 2001.

3.1.2 September 3, 2001.

We see in this case that the EXP1 and EXP3 are equally likely to simulate the observed peaks at Bernex and Avully but they are not quite successful at the other 3 receptor sites in Geneva where HYSPLIT_4 underestimates the observed values, particularly at Meyrin.



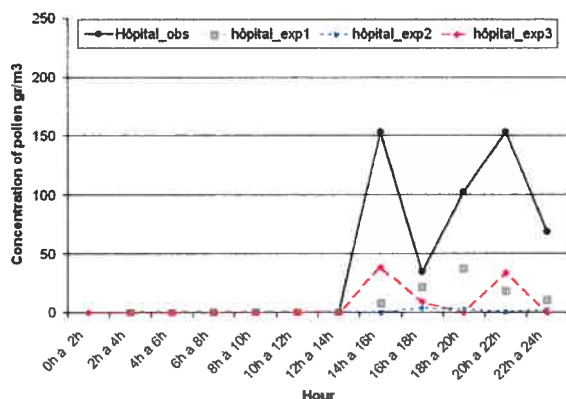
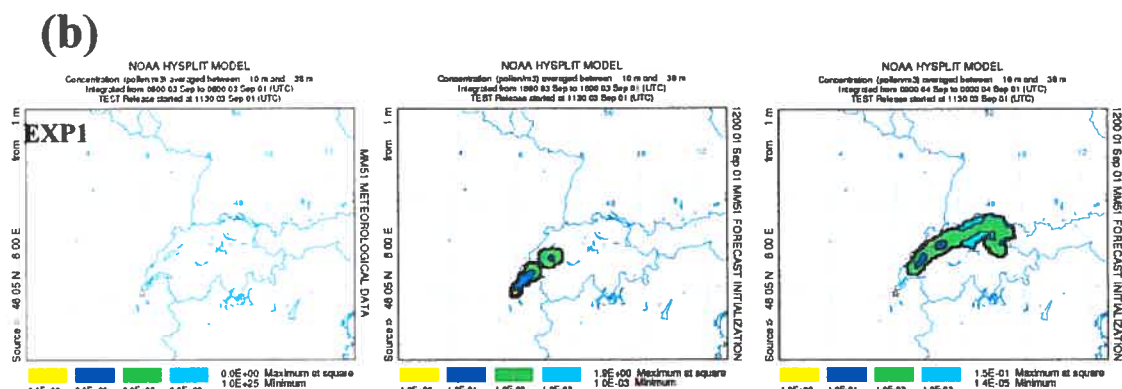


Figure 7 (a). Time series of observed and modeled pollen concentrations at the 5 receptor sites: Bernex, Avully, Hôpital, Presinges, Meyrin. Also shown is the modeled time series for each proposed experiment for September 3, 2001.

The evolution of the concentration is shown in the following panels for each experiment (Fig.7b). EXP1, EXP2 and EXP3 are the only experiments with potential to impact Geneva from a far off source in France. EXP2 seems to be much more diluted than its counterparts by the time it arrives at Geneva. We are therefore left with the suggestion that two sources, one at Romans-sur Isère and one at Geneva might be possible sources. Since, at this stage of the investigation, we have no way of verifying the emission rates of these sources we can not ascertain what are the relative contributions of EXP1 and EXP3 to the total measured concentration at the Geneva receptors.



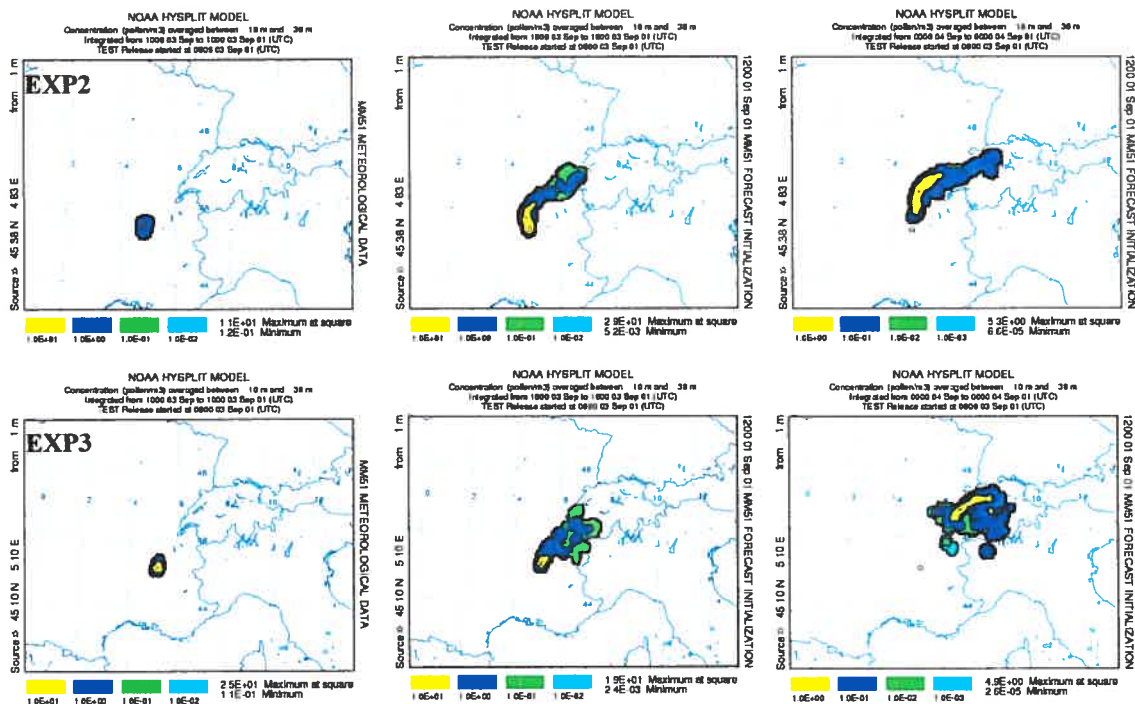


Figure 7. (b) Concentrations of pollen at 3 different times from left to right: September 3 0600Z, September 3 1800Z and September 4 0000Z for EXP1 and for EXP2, and EXP3, 3 September 1000Z, September 3 1800Z and 4 0000Z EXP3, 2001.

3.2.1 September 4 2002.

Here we present the concentration time series for September 4, 2002 for different experiment scenarios. Clearly from the concentration maps (Fig 8b) EXP1, EXP2 and EXP3 can potentially contribute to the pollen concentration measured at the receptor sites in Geneva. However, it appears that EXP3 and EXP2 (source at Rousillon) contributes the most to the variation of pollen concentration except at Bernex where EXP1 seems perform better although the peak appears 6 hr earlier (Fig 8a). In all experiments, concentrations were underestimated compared to the observed values, although the EXP3 captures a peak late in that day as observed.

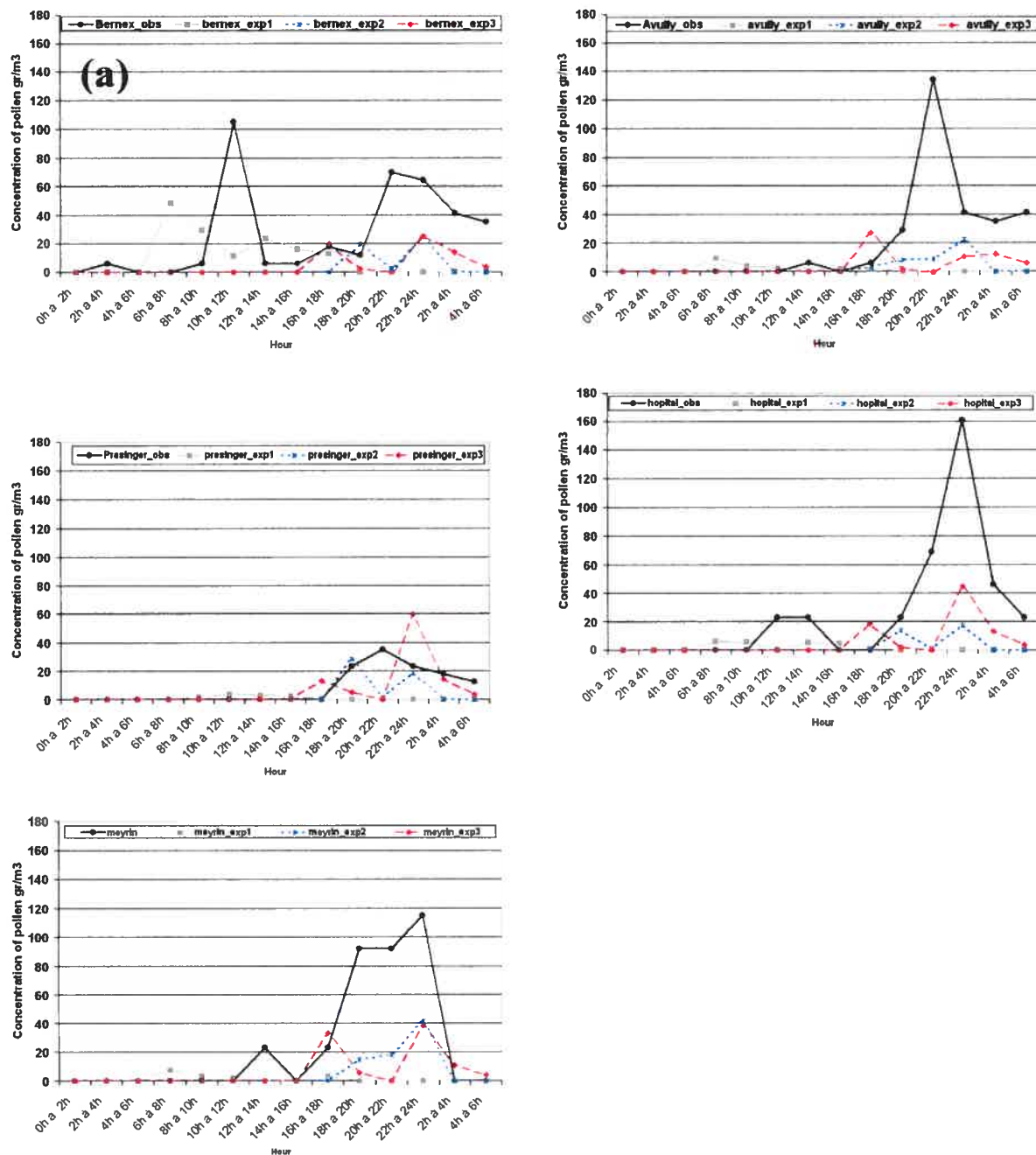


Figure 8 (a). Time series of observed and modeled pollen concentrations at the 5 receptor sites: Bernex, Avully, Hôpital, Presinges, Meyrin. Also shown is the modeled time series for each proposed experiment for September 4 2002.

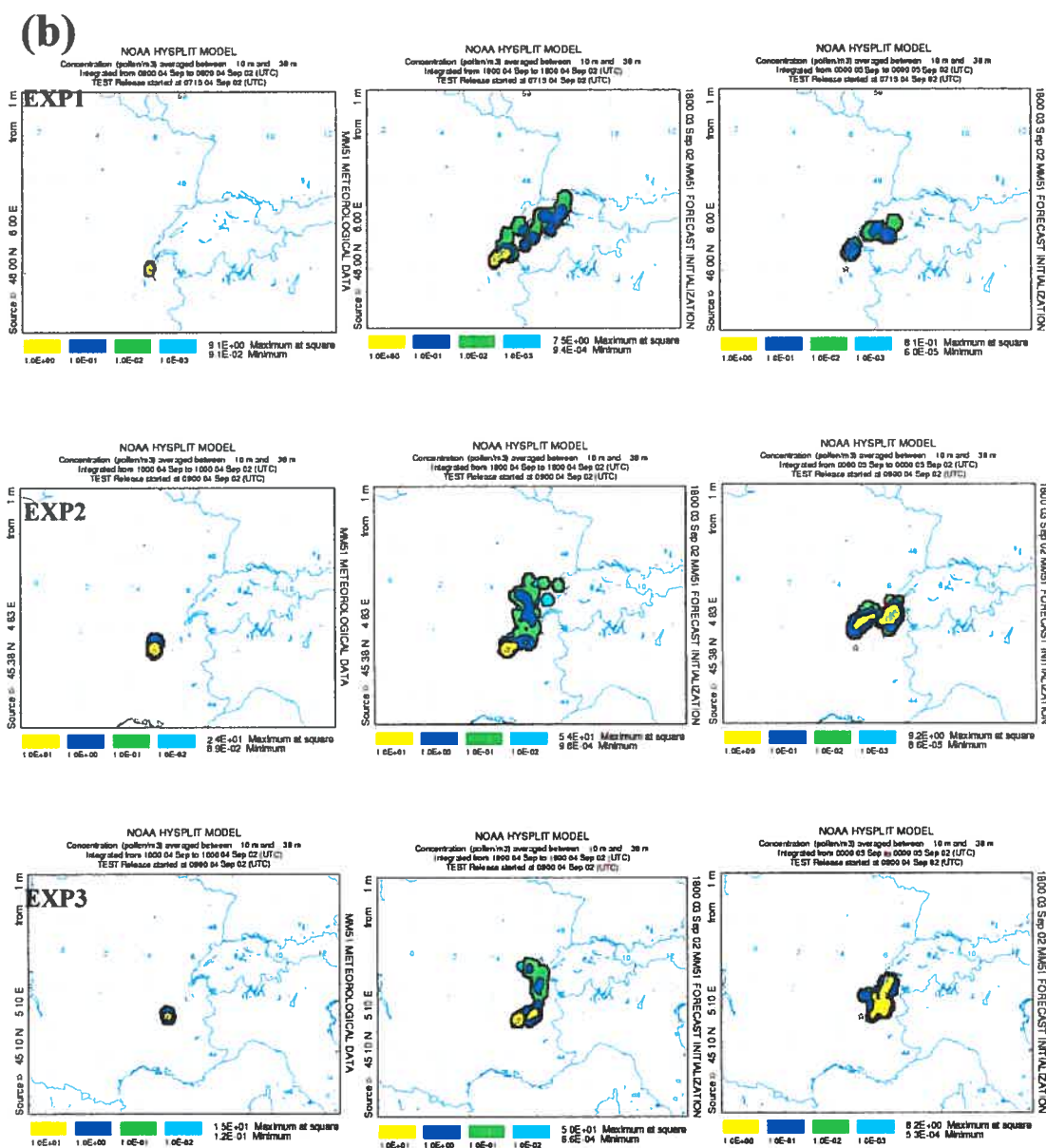


Figure 8 (b). Concentrations of pollen at 3 different times from left to right: September 4 0800Z, September 4 1800Z and September 5 0000Z for EXP1, and for EXP2, and EXP3 September 4 1000z, September 4 1800Z and September 5 0000Z, 2002.

3.2.2 September 7 and 8 2002.

Here, in general, the model is able to capture some of the behavior of the observed data

although it is still short of capturing the large amplitudes observed at Avully and at Hôpital. In this case, EXP3 seems better able to capture the observed peaks at the Geneva receptors. EXP1 has a more difficult time to model the observed concentrations than EXP3. The rest of the experiments showed zero concentrations for all the receptor sites in Geneva

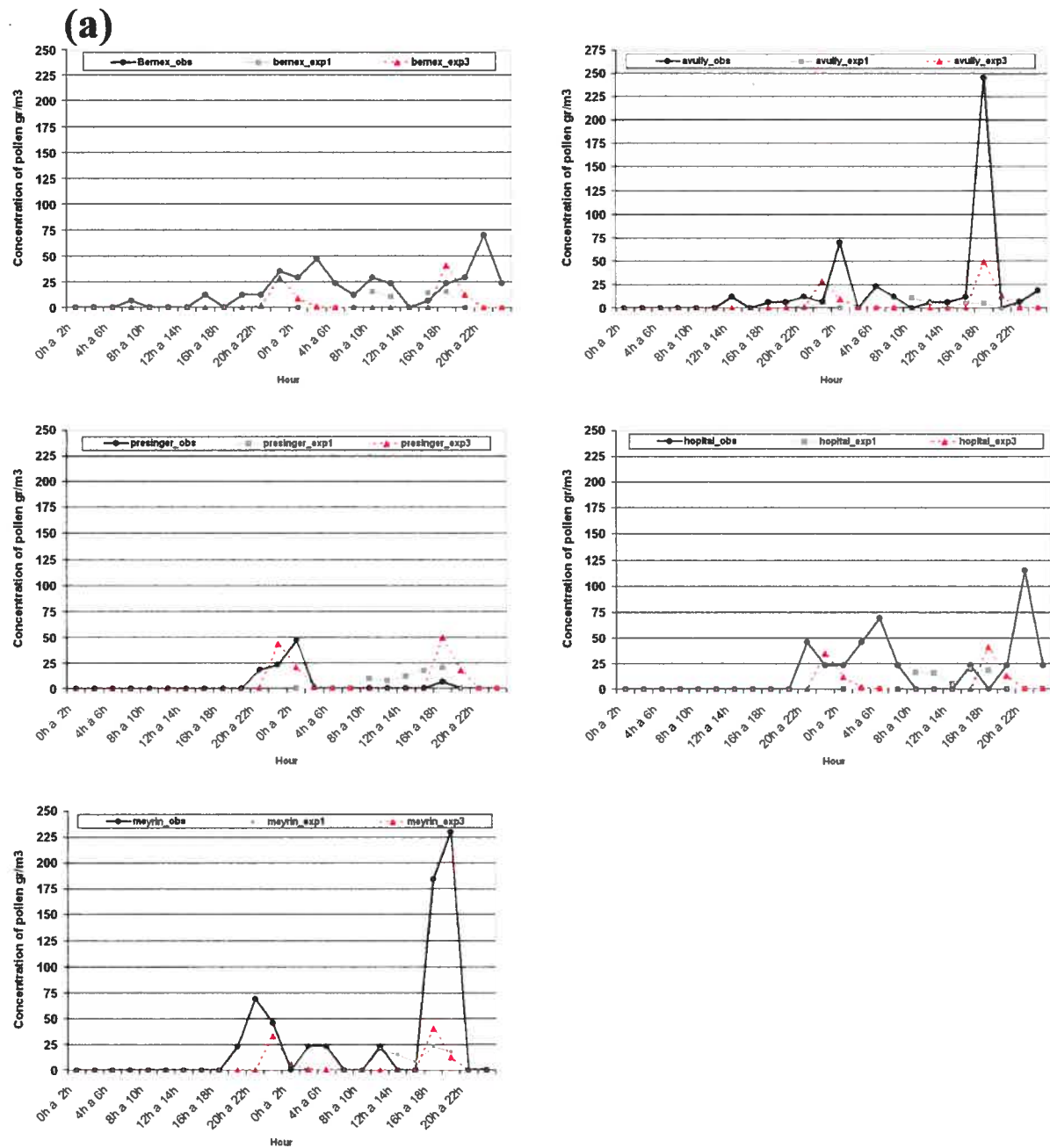


Figure 9 (a). Time series of observed and modeled pollen concentrations at the 5 receptor sites: Bernex, Avully, Hôpital, Presinges, Meyrin. Also shown are the modeled time series for each proposed experiment for September 7 and 8, 2002.

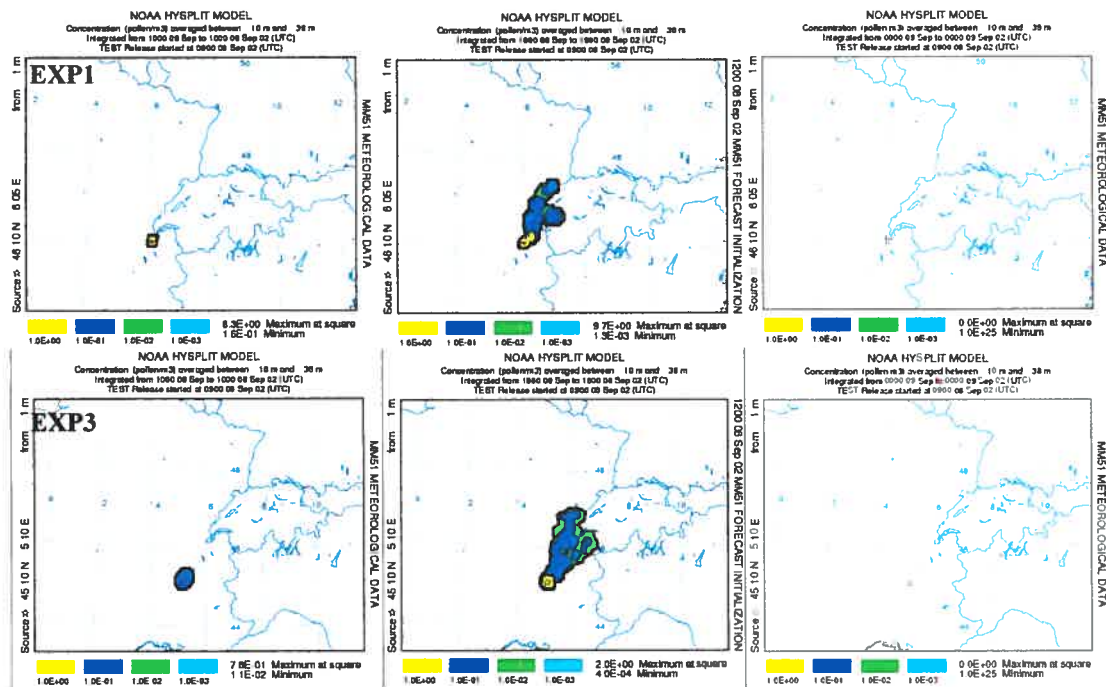


Figure 9 (b). Concentrations of pollen at 3 different times from left to right: September 8 0600Z, September 8 1800Z and September 9 0000Z and for EXP1, EXP3, 2002.

3.3 September 5, 2003

The model here is able to capture the peak of pollen early in the morning particularly at the station in Presinges in EXP1 (Fig 10a). For the rest of the stations both EXP1 and EXP3 do not perform very well although the observed concentrations are small. Figure 10(b) shows EXP1 for September 5 and how the plume resides longer near Geneva early in the morning, after which it is displaced further to the northeast. The EXP3 shows for September 5 how the plume reaches Geneva but is quickly diluted as it continues

northeast.

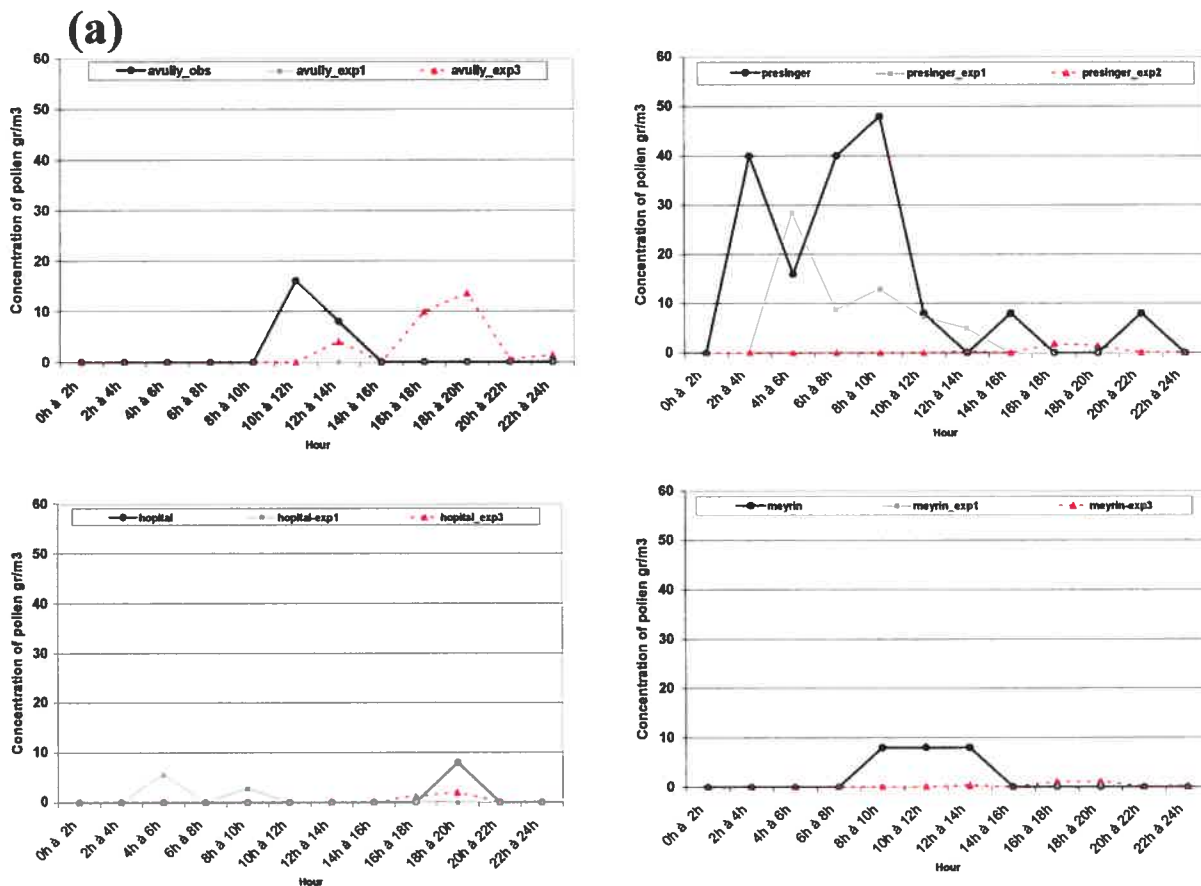
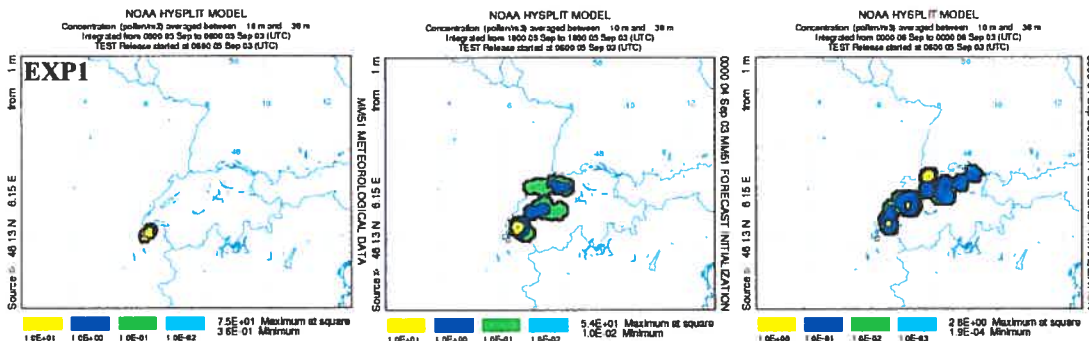


Figure 10 (a). Time series of observed and modeled pollen concentrations at the 5 receptor sites: Avully, Hôpital, Presinges, Meyrin. Also shown is the modeled time series for each proposed experiment for September 5 2003 .

(b)



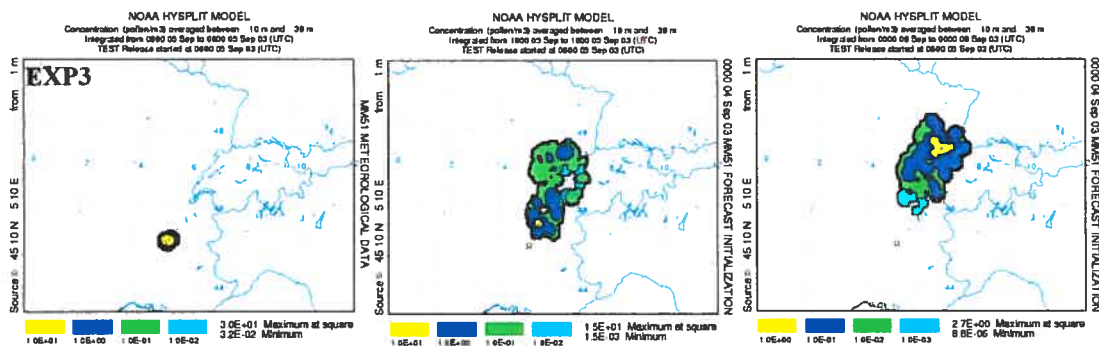


Fig. 10 (b) Concentrations of pollen at 3 different times from left to right: September 5 0800Z, September 5 1800Z and September 6 0000Z 2003 and for EXP1, EXP3.

5.0 Discussion and Conclusions

It is generally accepted that the majority of pollen trapped comes from local sources (Athanasios *et al.*, 2005). The distance pollen travels, once released into the air, is related to the wind as a vectorial quantity (Van de Water *et al.*, 2003).

All factors examined in the present study indicate that the detection of ragweed pollen in Geneva Switzerland for the periods 25 August and 5 September 2001 and 3 September and 8 September, 2002 and 2 September and 10 September 2003, is due to long distance transport as well as local sources in Geneva. We have considered Geneva to be a single source (EXP1) with 5 receptor sites: Bernex, Avully, Presinges, Hopital, Meyrin. To construct the long-distance emission scenarios, the following sources were used: Roussillon (EXP2), Romans sur Isère (EXP3), Lyon (EXP4). We have run 20 experiments (4 experiments for 5 dates) of which only 7 have shown concentrations at the receptor sites in Geneva at those dates. From these last cases, we have seen that 4 cases correspond to long-distance transport from Roman-Iseres (EXP3) and Rousillon (EXP2 only one case in 2002). The other 3 cases seem to be related to local Geneva sources (EXP1). Interestingly, 2002, the most active year of these 3 cases, has only EXP2 and EXP3 as the most likely scenarios, in other words, it is a transport dominated scenario. EXP1 and EXP2 contribute equally to the receptor concentrations in Geneva for year 2001 whereas 2003 seems to be dominated by the EXP1 scenario. Recently, a study of 23 years of pollen tendencies in Geneva has shown a significant increase of pollen counts over this period (Clot, 2002). Naturally, the question arises as to the origin of this change and what roles local and distant sources play. Special attention has been given to sources in Lyon France due to the obvious existing meteorological pathways. The study found that there were correlation between those measured concentrations in Lyon and those measured in Geneva although the latter was one order of magnitude smaller than the former, due to dilution over a 200 km fetch. Nevertheless, this was not always the case as in the year 2000 when meteorological conditions did not contribute to this pathway. It is interesting to note from the results of our study that 2001 and 2003 are also not years where transport scenarios dominated. In our study only 2002 demonstrated that possibility.

Our study shows that interannual variability exists and needs to be addressed with thorough meteorological analyses to establish the air-pathways of pollen with higher accuracy. The purpose of the present study is to exploit the source-oriented approach to investigate the relative importance of long-range transport versus local sources. This method relies heavily on how well the sources are known and how well the meteorological fields are modeled. To satisfy the requirement of higher spatial resolution the regional atmospheric model MM5 was used to downscale to a 10 km resolution the original coarse resolution (approximately 250 km resolution) NCEP reanalysis meteorological fields. Comparison with wind observations was deemed acceptable and most of the shifts in wind direction were captured by the MM5. We examined the possible impact that 3 sources of pollen might have at the 5 receptor network in Geneva. We found that for a given wind field and emission sources scenario it was possible to discriminate which source is more likely to contribute downwind at the receptors in Geneva. Clearly both long-range transport and well as local are important and observational and modeling results suggest that the latter can be significant and perhaps more important than the former. These results however are very dependent on our knowledge of how the emissions fluxes are distributed and how pollen grains are emitted. Two possible approaches are suggested: A more detailed mapping of plant density and higher density of network receptors near probable sources. The combination of these two pieces of information can help in reconstructing the sources and eventually creating an emission inventory. The modeling of meteorological variables also plays a very important role and it is recommended that a co-located meteorological station network is deployed together with the pollen network.

Bibliography

- Athanasios, D., Gioulekas, D., Lazopoulou, Ch., Balafoutis, Ch., Vokou, D., 2005 Transport of airborne pollen into the city of Thessaloniki: the effects of wind direction, speed and persistence. *Int. J. Biometeorol.* 49: 1432-1254.
- Aylor, D.E., 2002 Settling speed of corn (*Zea mays*) pollen . *J.Aerosol Sci.* 33: 1599-1605.
- Aylor, D.E., Schultes, P.N., Shields, J.E. 2003 An aerobiological framework for assesing cross-pollination in maize. *Agric. For. Meteorol.* 119:111-129.
- Aylor, D. E. 2004 Survival of maize (*Zea mays*) pollen exposed in the atmosphere. *Agric. For. Meteorol.*
- Barnes, C., Pacheco, F., Launduty, J., Hu, F., Portnoy, J. 2001 The effect of temperatute, relative humidity and rainfall on airborne ragweed pollen concentrations . 17: 61-68.
- Bass, J. D., Delpech, V., Beard, J., Bass, P., Walls S. R., 2000 Ragweed in Australia. 16: 107-111
- Carrosos, A., Gallesio, T.M. 2000 . Allergy to ragweed: clinical relevance in Turin. *Aerobiologia* 16: 155-158.
- Cecchi, L., Morabito, M., Domeneghetti M. P., Crisci, A., Onorari, M., Orlandini, S., 2006 Long distance transport of ragweed pollen as a potential cause of allergy in central Italy. *Annals of Allery, Asthma & Immunology* 96 : 87-91
- Coiffer , J., 2000 . Un demi-siecle de prevision numérique du temps .

La meteorologie 8e serie (Meteo-France). 30:11-29

Clot ,B., 2001 Airborne birch pollen in Neuchatel (Switzerland): onset, peak and daily patterns . *Aerobiologia* 17 : 25-29.

Clot, B., Schneiter, D., Tercier, Ph., Gehrig, R., Peeters, A., Thibaudon, M. 2002. Ambrosia pollen in Switzerland local production or transport?. *Allergie et Immunologie* Vol. XXXIV 4 127-128.

Clot, B., 2003 Trends in airborne pollen: An overview of 21 years of data in Neuchâtel (Switzerland). *Aerobiologia* 19 227-234

Comtois, P., 1997. Pollen dispersal and long distance transport : the case of thermophilic pollen in subarctic Canada. *Aerobiologia* 13: 37-42.

Comtois, P., Gagnon, L., 1990. La biologie du pollen de l'herbe a poux. *Bulletin du Institute Botanique de Montreal*. 14: 10-14.

Dahl, A., Strandhele, S., Whill, J., 1999. Ragweed - An allergy risk in Sweeden ! *Aerobiologia* 15: 293-297.

Dechamp , C., Calleja, M., Penel, V., Meon, H. 2002 . Progressively earlier onset of pollination of common ragweed in the Lyon-Bron area over the past 20 years. *Revue francaise d'allergologie et d'immunologie clinique*. 42: 546-550.

Draxler, R. R., and G.D. Hess (1997), Description of the HYSPLIT_4 modeling system, NOAA Tech Memo. 224

Draxler, R. R., and G.D. Hess (1998), An overview of the HYSPLIT_4 modelling systems for trajectories, dispersion, and deposition, *Aust. Meteorol Mag.*, 47, 295-308

Dudhia J., Gill, D., Guo, Y., Mannig, K., Michalakes, J., Bourgeois, A., Wang, W., Wilson, J., 2001 PSU/NCAR Mesoscale Modelling System Version 3 National Center for Atmospheric Research.

Garcia-Mozo, H., Galan, C., Aira, M. J., Belmonte, J., Diaz de la Guardia, C., Fernandez, D., Gutierrez, A. M., Rodriguez, F. J., Trigo, M. M., Dominguez-Vilches, E. Modelling start of oak pollen season in different climatic zones in Spain. *Agricultural and Forest Meteorology* 110: 247-257.

Gage, S. H., Isard, S. A., Colunga-G, M. 1999. Ecological scaling of aerobiological dispersal processes. *Agricultural and Forest Meteorology* 97 :249-261.

Helbig, N., Vogel, B., Vogel, H., Fiedler, F. 2004. Numerical modelling of pollen dispersion on the regional scale. *Aerobiologia* 3 3-19.

Jager, S., 2000. Ragweed (Ambrosia) sensitisation rates correlate with the amount of inhaled airborne pollen. A 14-year study in Vienna, Austria. *Aerobiologia*. 16: 149-153.

Jarosz, N., Loubet, B., Huber, L. 2004. Modelling airborne concentration and deposition rate of maize pollen. *Atmospheric Environment*. 38: 5555-5566

Kawashima, S., Takahashi, Y., 1999. An improved simulation of mesoscale dispersion of airborne cedar pollen using a flowering-time map. *Grana* 38: 316-324, 1999.

Laiardi, M., Thibaudon, M., Besancenot, J. P. 2003 Two statistical approaches to forecasting the starts and duration of the pollen season of Ambrosia in the area of Lyon (France). *Int. J. Biometeorol.* 48 : 65-73

Laaidi, K., Laaidi, M., 1999. Airborne pollen of Ambrosia in Burgundy (France) 1996-1997. *Aerobiologia* 15: 65-69.

Laaidi, K., Laaidi, M., Besancenot, J.P. 1997 . Pollens, Pollinosse et Meteorologie. *La Meteorologie* 8e serie (Meteo-France) . 20 : 41-55

Makra, L., Juhasz, M., Borsos, E., Béczi, R. 2004. Meteorological variables connected with airborne ragweed pollen in Southern Hungary. *Int. J. Biometeorol.* 49: 37-39.

Munuera, G.M., Carrion Garcia S.J., Garcia Selles, J. 1999. Aerobiology of Artemisia airborne pollen in Murcia (SE Spain) and its relationship with weather variables: annual and intradiurnal variations for three different species. Wind vectors as tool in determining pollen origin. *Int. J. Biometeorol.* 43 : 51-63.

Pasken, R., Pietrowicz, A. J. 2005. Using dispersion and mesoscale meteorological models to forecast pollen concentrations. *Atmospheric Environment* 39 : 7689-7701.

Rybníček, O., Novotná, B., Rybníčková, E., Rybníček, K. 2000. Ragweed in the Czech Republic. *Aerobiologia* 16:287-290

Silva Palacios, I., Tormo Molina, R., Rodriguez Munoz, A.F., 2000. Influence of wind direction on pollen concentration in the atmosphere. 44: 128-133.

Schneiter, D., Clot, B., Defila, C., Gehrig, R. 2002. Influence of climate changes on the phenology of plants and the presence of pollen in the air in Switzerland. *Allergie et Immunologie* Vol.. XXXIV 4 114-116

Spieksman , F.Th.M., Corden, M.J., Detandt, M., Millington, M.W., Nikkels, H., Nolard, N., Schoenmakers , C.H.H., Wachter , R., Weger, L.A., Willems , R., Emberlin, J. 2003. Quantitative trends in annual totals of five common airborne pollen

types (Betula, Quercus, Poaceae, Urtica, and Artemisia), at five pollen-monitoring stations in western Europe.

Taramarcaz, P., Lambelet, C., Clot, B., Keimer, C., Hauser, C. 2005. Ragweed (Ambrosia) progression and its health risks: will Switzerland resist this invasion? Swiss Medical Weekly 135 : 538-548.

Van de Water., P.K. Keever., Th. Main., E.Ch. Levetin., E. 2003 An assessment of predictive forecasting of juniperus ashei pollen movement in the Southern Great Plains, USA. Int.J Biometeorol 48: 74-82

Wayne, P., Foster, S., Connolly, J., Bazaz, F., Epstein, P., 2002 Production of allergenic pollen by ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) is increased in CO₂ – enriched atmospheres. Annals of Allergy, Asthma & Immunology 88 : 279-282.

Westbrook, J. K., Isard, S.A. 1999 Atmospheric scales of biotic dispersal. Agricultural and Forest Meteorology 97: 263-274.

Yankova, R., Zlatev, V., Baltadjieva, D., Mustakov, T., Mustakov, B., 2000 Quantitative dynamics of Ambrosia pollen grains in Bulgaria. Aerobiologia 16: 299-301.

CHAPITRE 4

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

La raison d'être de cette étude était de déterminer les différents mécanismes de transport du pollen qui prévalent dans la région de Genève. On a cherché à savoir si la méthode « source-orientée » est une technique fiable. En utilisant la méthode des rétro-trajectoires, nous avons recherché les sources de pollen d'ambrosie possibles dans la région Rhône-Alpes. Par exemple, pour l'année 2001, le modèle suggère à partir des rétro-trajectoires que ces sources sont situées près de Romans sur Isère, Bourg en Bresse et à l'est de la Suisse. Pour l'année 2002, le modèle suggère la présence de sources à Lyon, Romans sur Isère et Roussillon. Enfin, pour l'année 2003, des sources ont été trouvées à Roussillon et Romans sur Isère. L'ensemble des données analysées suggère donc que la Région Rhône-Alpes est une des sources importantes de pollen d'ambrosie pour la région de Genève. Par ailleurs, les résultats obtenus suggèrent que, pour l'année 2001, selon les différents épisodes simulés, il existe aussi une contribution locale (Bernex) au pollen observé dans la région de Genève. Le modèle suggère qu'il existe un transport de pollen de Roussillon et Romans sur Isère vers Genève. Mais malheureusement, on ne dispose pas de données de concentration pollinique pour ces deux sources en 2001 pour confirmer cet événement. De même, pour l'année 2003, on observe une production locale dont la source est située vers Presinges. Nos simulations montrent qu'un transport du pollen depuis Romans sur Isère vers Genève est possible, mais on ne peut pas confirmer cet événement parce qu'il n'y a pas non plus de données disponibles pour cette source. Par contre, si la source est placée à Roussillon on peut observer que les concentrations en pollen mesurées sont minimales et que la direction du vent prédominant est du nord-ouest. Les expériences effectuées avec le modèle suggèrent qu'il n'y a pas de transport de Roussillon vers Genève car le vent soufflait vers le nord. Toutefois, pour l'année 2002, un transport sur une longue distance depuis

la région Rhône-Alpes (Roussillon et Romans sur Isère) est observé, ainsi qu'une production locale. Pour cette année nous disposons de données polliniques de la station de Roussillon donc on peut constater un transport de cette région vers Genève mais pour Romans sur Isère, on n'a pas de données disponibles.

D'autres travaux évoquent qu'une grande partie du pollen d'ambroisie mesurée en Suisse provient d'un transport sur une longue distance. Les trajectoires simulées par Météo-Suisse confirment que les masses d'air provenant de la vallée du Rhône en France sont une cause possible de l'augmentation de la concentration en ambroisie observée à Genève (Clot, 2002). Quelques analyses effectuées en 2000 montrent que le pollen trouvé à Genève ne provient pas de la région de Lyon. Il en va de même pour l'année 2001.

Notre étude montre qu'il existe un transport depuis la Région Rhône-Alpes (Roussillon, Romans sur Isère) vers Genève. On peut conclure que la présence de pollen à Genève ne provient pas de la région Lyonnaise pour les années 2001, 2002 et 2003. Pendant ces trois années, le pollen d'ambroisie n'a pas été transporté depuis Lyon vers Genève car le vent n'a pas soufflé dans la bonne direction. On peut conclure que la tendance à l'augmentation de la concentration en pollen d'ambroisie à Genève est provoquée à la fois par la production locale et le transport sur une longue distance depuis la région Rhône-Alpes. Ces résultats suggèrent que la méthode source-récepteur est fiable pour la simulation du transport et de la dispersion de pollen à une échelle de 200 km.

Il faut remarquer qu'un inventaire des émissions et la disponibilité d'un réseau d'observation polliniques plus dense, auraient permis de fournir des bases plus solides à notre étude.

Une autre recommandation pour des travaux futurs serait de mesurer la distribution verticale du pollen dans l'atmosphère. Avec ce type de recherche, il serait plus facile de comprendre la dynamique du transport du pollen dans la couche limite planétaire.

Bibliographie générale

Aylor, D.E., 2002 Settling speed of corn (*Zea mays*) pollen . *J.Aerosol Sci.* 33: 1599-1605.

Aylor, D.E., Schultes, P.N., Shields, J.E. 2003 An aerobiological framework for assessing cross-pollination in maize. 119:111-129.

Barnes, C., Pacheco, F., Launduty, J., Hu, F., Portnoy, J. 2001 The effect of temperature, relative humidity and rainfall on airborne ragweed pollen concentrations . 17: 61-68.

Bass, J. D., Delpech, V., Beard, J., Bass, P., Walls S. R., 2000 Ragweed in Australia. 16: 107-111

Carrosos, A., Gallezio, T.M. 2000. Allergy to ragweed: clinical relevance in Turin. *Aerobiologia* 16: 155-158.

Coiffer, J., 2000 . Un demi-siècle de prévision numérique du temps.
La météorologie 8ème série (Météo-France). 30:11-29

Clot, B., Schneiter, D., Tercier, Ph., Gehrig, R., Peeters, A., Thibaudon, M. 2002. Ambrosia pollen in Switzerland: local production or transport? *Allergie et Immunologie* Vol. XXXIV 4 127-128.

Clot, B., 2001 Airborne birch pollen in Neuchatel (Switzerland): onset, peak and daily patterns . *Aerobiologia* 17 : 25-29.

Comtois, P., 1997. Pollen dispersal and long distance transport: the case of thermophilic pollen in subarctic Canada. *Aerobiologia* 13: 37-42.

Comtois, P., Gagnon, L., 1990. La biologie du pollen de l'herbe à poux.
Bulletin de l'Institut Botanique de Montréal. 14: 10-14.

Dahl, A., Strandhele, S., Whill, J., 1999. Ragweed - An allergy risk in Sweeden !
Aerobiologia 15: 293-297.

Dechamp , C., Calleja, M., Penel, V., Meon, H. 2002 . Progressively earlier onset of
pollination of common ragweed in the Lyon-Bron area over the past 20 years. Revue
Française d'allergologie et d'immunologie clinique. 42: 546-550.

Escudero, M., Stein, A., Draxler, R.R., Querol, X., Alastuey, A., Castillo, S., Avila, A.,
2006. Determination of the contribution of northern Africa dust source areas to PM10
concentration over the central Iberian Peninsula using the Hybride Single-Particule
Lagrangian Integrated Trajectory model (HYSPLIT) model. Journal of Geophysical
Research, Vol. 111, D06210, doi: 10.1029/2005JD006395

Garcia-Mozo , H., Galan, C., Aira, M. J., Belmonte, J., Diaz de la Guardia , C.,
Fernandez , D., Gutierrez, A. M., Rodriguez , F. J., Trigo, M. M., Dominguez-Vilches,
E. Modelling start of oak pollen season in different climatic zones in Spain. Agricultural
and Forest Meteorology 110: 247-257.

Gage, S.H., Isard, S.A., Colunga-G, M. 1999. Ecological scaling of aerobiological
dispersal processes. Agricultural and Forest Meteorology 97 :249-261.

Helbig, N., Vogel, B., Vogel, H., Fiedler, F. 2004. Numerical modelling of pollen
dispersion on the regional scale. Aerobiologia 3 3-19.

Jager , S., 2000. Ragweed (Ambrosia) sensitisation rates correlate with the amount of
inhaled airborne pollen. A 14-year study in Vienna, Austria. Aerobiologia. 16: 149-153.

Jarosz, N., Loubet, B., Huber, L. 2004. Modelling airborne concentration and deposition rate of maize pollen.

Laiaidi, M., Thibaudon, M., Besancenot, J. P. 2003 Two statistical approaches to forecasting the starts and duration of the pollen season of Ambrosia in the area of Lyon (France). *Int. J. Biometeorol.* 48 : 65-73

Laaïdi, K., Laaïdi, M., 1999. Airborne pollen of Ambrosia in Burgundy (France) 1996-1997. *Aerobiologia* 15: 65-69.

Laaïdi, K., Laaïdi, M., Besancenot, J.P. 1997. Pollens, Pollinose et Météorologie. *La Météorologie 8ème série (Météo-France)* . 20 : 41-55

Makra, L., Juhasz, M., Borsos, E., Béczi, R. 2004. Meteorological variables connected with airborne ragweed pollen in Southern Hungary. *Int. J. Biometeorol.* 49: 37-39.

Munuera, G.M., Carrion Garcia S.J., Garcia Selles, J. 1999. Aerobiology of Artemisia airborne pollen in Murcia (SE Spain) and its relationship with weather variables: annual and intradiurnal variations for three different species. Wind vectors as tool in determining pollen origin. *Int. J. Biometeorol.* 43 : 51-63.

Pasken, R., Pietrowicz, A. J. 2005. Using dispersion and mesoscale meteorological models to forecast pollen concentrations. *Atmospheric Environment* 39 : 7689-7701.

Silva Palacios, I., Tormo Molina, R., Rodriguez Munoz, A.F., 2000. Influence of wind direction on pollen concentration in the atmosphere. 44: 128-133.

Schneiter, D., Clot, B., Defila, C., Gehrig, R. 2002. Influence of climate changes on the phenology of plants and the presence of pollen in the air in Switzerland. *Allergie et Immunologie Vol.. XXXIV* 4 114-116

Stull B, R., 2000. Meteorology for Scientists and Engineers.

Spieksman , F.Th.M., Corden, M.J., Detandt, M., Millington, M.W., Nikkels, H., Nolard, N., Schoenmakers , C..H.H., Wachter , R., Weger, L.A., Willems , R., Emberlin, J. 2003. Quantitative trends in annual totals of five common airborne pollen types (Betula, Quercus, Poaceae, Urtica, and Artemisia), at five pollen-monitoring stations in western Europe.

Thibaudon M, Lachasse C, Finet F. 2003. Ragweed in France and the Rhone-Alpes region Lyon, Bourgoin, Grenoble, Roussillon. Allerg Immunol (Paris). Mar; 35(3):87-91.

Thibaudon M, Lachasse C. 2004 Ambrosia pollen under high surveillance Allerg Immunol (Paris).Nov; 36(9):337-41.

Taramarcaz, P., Lambelet, C., Clot, B., Keimer, C., Hauser, C. 2005. Ragweed (Ambrosia) progression and its health risks: will Switzerland resist this invasion? Swiss Medical Weekly 135 : 538-548.

Westbrook, J. K., Isard, S.A. 1999 Atmospheric scales of biotic dispersal. Agricultural and Forest Meteorology 97: 263-274.